

# Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Aeroespacial

## Diseño de Bancada y Sistema de Control para la Integración de Pila de Combustible en un Vehículo

Autor: Javier Santaolaya Sánchez

Tutor: Carlos Bordons Alba

**Dep. Ingeniería de Sistemas y Automática  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2017







Proyecto Fin de Carrera  
Ingeniería Aeroespacial

# **Diseño de Bancada y Sistema de Control para la Integración de Pila de Combustible en un Vehículo**

Autor:

Javier Santaolaya Sánchez

Tutor:

Carlos Bordons Alba

Profesor Titular

Dep. Ingeniería de Sistemas y Automática  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Proyecto Fin de Carrera:   Diseño de Bancada y Sistema de Control para la Integración de Pila de Combustible en un Vehículo

Autor:           Javier Santaolaya Sánchez  
Tutor:           Carlos Bordons Alba

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:



# Agradecimientos

---

Gracias a mis compañeros con los que he compartido estos años y nos hemos ayudado en tantas ocasiones. Gracias a Juanjo Márquez, nada de este trabajo hubiese sido lo mismo sin ti, gracias por tu ayuda, implicación y cercanía en todo momento, me he sentido como en casa.

Gracias a Carlos Bordons por la oportunidad que me ha brindado, por confiar en mi y permitirme formar parte de esta gran familia que tiene el FCCL.

Una vez llegado a este momento, el final del grado, no me puedo olvidar de aquellos profesores que hicieron que amase la ciencia. Gracias Agustín y Ángela por vuestro buen trabajo y dedicación.

A Virtudes y Alfonso, mis padres sevillanos, me acogisteis desde el minuto uno y habéis sido el mejor regalo que me ha dado Sevilla, muchas gracias por todo.

A mis padres, todo esto es vuestro, gracias por estar siempre ahí, por vuestro apoyo incondicional y por confiar siempre en mí. Nada hubiese sido posible sin vuestro sacrificio.

A mi hermano, por esos inicios que marcaron nuestro destino. Has sido fundamental en mi enseñanza.

A Leticia, por mantenerte a mi lado durante este largo tiempo, en lo bueno, en lo malo, cuando nos veíamos y cuándo no. Has sido un pilar fundamental.

Por último, a mis abuelos, sois lo mejor que tengo y un gran ejemplo a seguir.

Mil gracias a todos.

*Javier Santaolaya Sánchez  
Graduado en Ingeniería Aeroespacial*

*Sevilla, 2017*



# Resumen

---

En el presente documento se pretende realizar el diseño de una bancada de una pila de combustible de hidrógeno, alimentada por dos botellas de hidruros y controlada por un algoritmo, el cuál también debe de ser programado mediante LabView. Con el algoritmo se desea conseguir el control del encendido y apagado de la pila de combustible en función de la carga de un banco de baterías, siendo el objetivo final de esta pila el del aumento de autonomía de dichas baterías.





# Abstract

---

In this document, we intend to design a bench for a hydrogen fuel cell, powered by two hydride cylinders and controlled by an algorithm, which must also be programmed through LabView. With the algorithm, it is desired to control the ignition and shutdown of the fuel cell according to the charge of a battery bank, being the final objective of this battery to increase the autonomy of said batteries.



# Índice Abreviado

---

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
<i>Notación</i>	XI
<b>1 Descripción y Objetivos</b>	<b>1</b>
1.1 Descripción General	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrategia Seguida para Lograr los Objetivos	2
<b>2 Estado Del Arte</b>	<b>5</b>
2.1 Introducción	5
2.2 Funcionamiento y Ventajas	5
2.3 Historia	7
2.4 Uso y Aplicaciones	7
2.5 PEM NEXA 1200	8
<b>3 Montaje de la Bancada</b>	<b>11</b>
3.1 Introducción	11
3.2 Material Necesario	12
3.3 Montaje Teórico	17
<b>4 Botellas de Hidruro</b>	<b>21</b>
4.1 Introducción	21
4.2 Ovonic 85G555B	22
<b>5 Desarrollo del Controlador de la PEM para la Bancada</b>	<b>31</b>
5.1 Requisitos para el Diseño del Controlador	31
5.2 Descripción del Algoritmo Diseñado	31
<b>6 Conclusiones y Líneas Futuras de Investigación</b>	<b>43</b>
6.1 Conclusiones	43
6.2 Líneas Futruas de Investigación	44
<i>Índice de Figuras</i>	45
<i>Índice de Tablas</i>	47



# Índice

---

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
<i>Notación</i>	XI
<b>1 Descripción y Objetivos</b>	<b>1</b>
1.1 Descripción General	1
1.1.1 Desarrollo de la Bancada	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Montaje de una Bancada	2
1.3 Estrategia Seguida para Lograr los Objetivos	2
<b>2 Estado Del Arte</b>	<b>5</b>
2.1 Introducción	5
2.2 Funcionamiento y Ventajas	5
2.3 Historia	7
2.4 Uso y Aplicaciones	7
2.5 PEM NEXA 1200	8
<b>3 Montaje de la Bancada</b>	<b>11</b>
3.1 Introducción	11
3.2 Material Necesario	12
3.3 Montaje Teórico	17
<b>4 Botellas de Hidruro</b>	<b>21</b>
4.1 Introducción	21
4.2 Ovonic 85G555B	22
4.2.1 Llenado de las Botellas	25
Botella 1	28
Botella 2	30
<b>5 Desarrollo del Controlador de la PEM para la Bancada</b>	<b>31</b>
5.1 Requisitos para el Diseño del Controlador	31
5.2 Descripción del Algoritmo Diseñado	31
<b>6 Conclusiones y Líneas Futuras de Investigación</b>	<b>43</b>
6.1 Conclusiones	43
6.2 Líneas Futruas de Investigación	44
<i>Índice de Figuras</i>	45
<i>Índice de Tablas</i>	47



## Notación

---

PEM                      Pila de combustible de membrana polimérica.





# 1 Descripción y Objetivos

---

*Los científicos estudian el mundo tal como es; los ingenieros crean el mundo que nunca ha sido.*

THEODORE VON KARMAN

En este capítulo se define cual ha sido el objeto de estudio, así cómo el camino seguido para la obtención de nuestros objetivos.

## 1.1 Descripción General

Se desea realizar el diseño y montaje de una pila de combustible de membrana polimérica (PEM), en concreto, la NEXA1200, en una bancada cuya alimentación principal es un banco de baterías.

El objetivo final de dicha bancada es probar el sistema de la pila de combustible antes de introducirlo en el coche eléctrico FOX que tiene el departamento, consiguiendo con ello un coche híbrido con mayor autonomía. Aunque esta integración no se realice en este trabajo será necesario conocer el funcionamiento de dicho coche para el diseño óptimo de la bancada.

Para ello es necesario, tras el diseño del montaje, desarrollar un sistema de control que gobierne el encendido y apagado de la PEM según la carga de las baterías.

### 1.1.1 Desarrollo de la Bancada

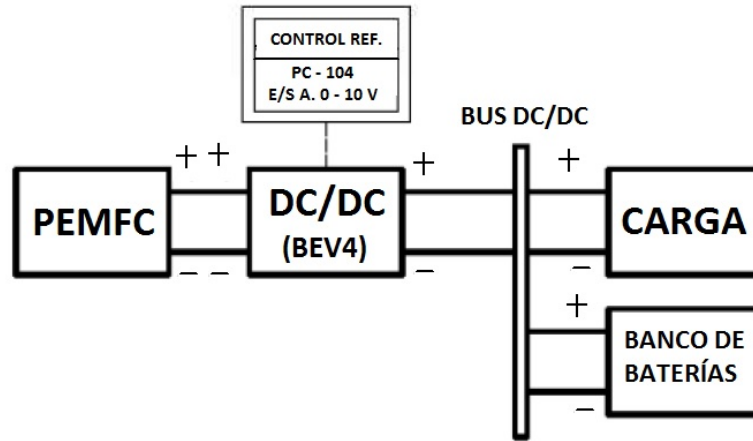
Se desea realizar la integración de una PEM en un vehículo eléctrico, el cuál está alimentado por un banco de baterías que se encuentra conectado directamente al bus de potencia, pero antes se debe de probar el sistema en una bancada. La PEM no proporciona una tensión de salida constante, sino que depende de su propia curva de polarización. Además, esta tensión no es suficiente para alimentar el bus de potencia, por lo que para conseguir que dicha tensión de alimentación sea lo suficientemente elevada se dispone de un convertidor DC/DC de impulsos elevador de tensión unidireccional. Dicho convertidor es el BEV4.

El convertidor BEV4 necesario para la instalación de la bancada consta de un control interno que en función de referencias analógicas (0-10V) fija una tensión mínima de funcionamiento en la entrada y un límite máximo de tensión de salida. Dichas referencias analógicas pueden ser ajustadas inicialmente o durante el funcionamiento del convertidor.

Por otro lado se busca que la PEM funcione en un rango de potencia determinado siempre que sea posible. Este rango se debe de situar en la zona lineal de la propia curva de polarización de la pila de combustible. Para conseguir esto es necesario realizar un control en tiempo real de las referencias de tensión e intensidad del convertidor BEV4. Podemos encontrarnos dos casos: aquel en el que la potencia demandada por los diferentes actuadores del vehículo sea inferior a la potencia generada por la pila de combustible, en el que

las baterías deben actuar como sumideros; y aquel en el que la potencia generada por la pila sea insuficiente para alimentar los actuadores del vehículo, en el que el banco de baterías debe actuar como fuente de energía. Todo lo anterior está resuelto en el Trabajo Fin de Máster del compañero Juan José Márquez Quintero.

A continuación se muestra el esquema genérico del sistema:



**Figura 1.1** Esquema General Conexión Bancada.

El control del convertidor ya se encuentra programado, lo que se tendrá que programar en la bancada será el funcionamiento de la pila, es decir, cuándo se considerará que debe de estar encendida para aumentar la autonomía de las baterías y cuando se deberá de apagar.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Montaje de una Bancada

- Diseñar y desarrollar el montaje de una pila de combustible en una bancada con el objetivo de que una vez probada y verificada integrarla en un coche eléctrico alimentado inicialmente con baterías.
- Realizar el control y la supervisión de las referencias que le llegan a la PEM y con ellas decidir el encendido o apagado de dicha pila, con el objetivo de aumentar la autonomía de las baterías.

## 1.3 Estrategia Seguida para Lograr los Objetivos

Para el diseño de la bancada, la estrategia seguida ha sido investigar sobre diseños e instalaciones de bancada de hidrógeno, con el objetivo de conocer la mejor disposición de cada dispositivo, los materiales utilizados, las marcas de los dispositivos para realizar la compra.

Una vez realizado el diseño teórico se llevará a cabo la programación en Labview del controlador del encendido y apagado de la PEM, así como el del convertidor DC/DC.

Una vez conocidos los objetivos del trabajo se detalla la estrategia seguida para alcanzar dichos objetivos:

- En el segundo capítulo se realiza un resumen sobre las pilas de combustible y sobre su historia, así como de la pila con la que se va a trabajar.
- En el tercer capítulo se expone cómo se llega al diseño final de la bancada y se explica éste junto con todo el material necesario para ello.
- En el cuarto capítulo se explican las características de las botellas de hidruro con las que se va a realizar la bancada. También se detalla la manera más eficiente y segura de cargar dichas botellas con hidrógeno comparando dos tipos de cargas diferentes.

- En el quinto capítulo se exponen los requisitos del algoritmo que se debe programar y se explica cómo se ha hecho.
- Por último, en el capítulo sexto se dan las conclusiones finales y las futuras líneas de trabajo.



## 2 Estado Del Arte

---

*Una de las virtudes del ingeniero es la eficiencia.*

GUANG TSE

En este capítulo se conocerá un poquito la historia de las pilas de combustible y cuál es su funcionamiento, así como sus futuras aplicaciones.

### 2.1 Introducción

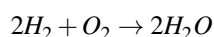
Una celda o pila de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de reacción directamente en energía eléctrica, mientras se suministre combustible y oxidante a sus electrodos, sin más limitaciones que los procesos de degradación o mal funcionamiento de los componentes. Como resultado de la reacción electroquímica se produce agua y electricidad. El agua abandona la pila de combustible a través de los electrodos y la corriente eléctrica pasa a un circuito externo.

En principio, cualquier sustancia susceptible de oxidación química, que pueda suministrarse de forma continua a la pila, puede utilizarse como combustible. Del mismo modo, cualquier sustancia que se reduzca químicamente de forma suficientemente rápida puede servir como oxidante. Hidrógeno y oxígeno gaseosos son el combustible y oxidante elegidos en la mayoría de las aplicaciones de las pilas de combustible. El hidrógeno presenta una alta reactividad en presencia de catalizadores adecuados, puede obtenerse a partir de hidrocarburos, y alcanza una alta densidad energética cuando se almacena criogénicamente para aplicaciones en ambientes cerrados. El oxígeno se obtiene directamente del aire siendo su almacenamiento fácil y económico.

Las pilas de combustible se diferencian de las baterías en que éstas últimas son dispositivos de almacenamiento de energía. El máximo de energía disponible se determina por la cantidad de reactivos químicos almacenados dentro de la propia batería que cesará de producir energía cuando se consuman los reactivos químicos. En una batería secundaria, los reactivos químicos son regenerados por recarga, que implica poner energía de una fuente externa en la batería.

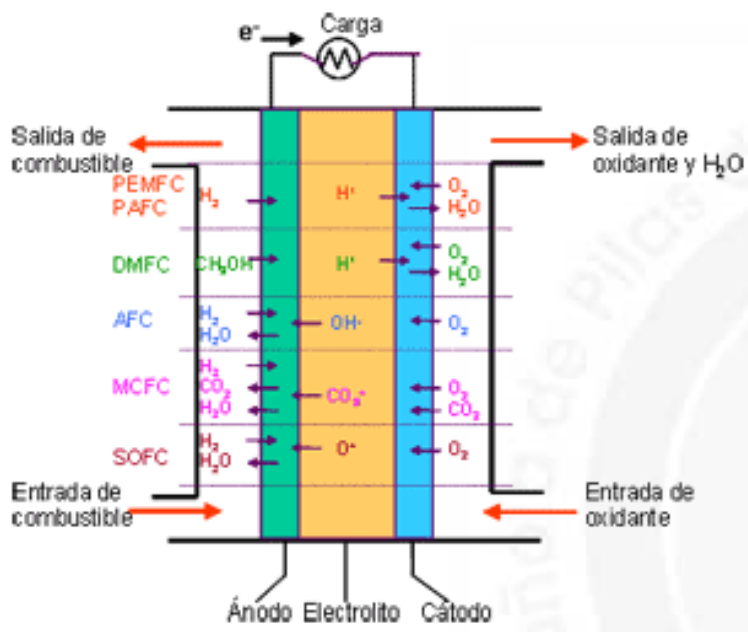
### 2.2 Funcionamiento y Ventajas

La reacción global que tiene lugar en una pila de combustible es la combinación de hidrógeno y oxígeno para formar agua:



A diferencia de la combustión convencional, en las pilas de combustible, comburente y combustible no entran en contacto directo. En el ánodo tiene lugar la oxidación del combustible (semireacción de oxidación),

mientras que en el cátodo el oxidante consume los iones positivos del electrolito y los electrones generados en el ánodo (semirreacción de reducción), que se mueven por la diferencia de potencial generada entre los dos electrodos:



**Figura 2.1** Funcionamiento de la Pila de Combustible.

Los elementos básicos de una celda de combustible son los electrodos, el cátodo, polo positivo, y el ánodo, polo negativo; el electrolito, sustancia encargada de transportar los iones producidos en las reacciones redox; la matriz, que contiene el electrolito y que no es necesaria cuando éste es sólido; y la placa bipolar, que actúa como colector de corriente y distribuidor de gas.

En el funcionamiento de la celda, los gases pasan hacia el electrolito a través de los poros de los electrodos, los oxidantes a través del cátodo y los combustibles a través del ánodo. Se produce una interfase electrodo-electrolito-reactivos que juega un papel determinante en el comportamiento electroquímico de la celda. En esta interfase, región muy delgada de unas pocas micras de espesor, el gas se difunde hasta la superficie del electrodo mojada por el electrolito, donde reacciona electroquímicamente produciendo las cargas eléctricas que crean la corriente eléctrica exterior, y los iones que son transportados a través del electrolito cerrando el circuito. La cantidad de electrolito presente en la interfase es un factor clave. Un excesivo contenido en electrolito en la interfase dificulta el acceso de los gases a los centros reactivos, donde se encuentra el catalizador, mientras que un contenido demasiado bajo de electrolito en la interfase limita el transporte de los iones a los lugares donde tiene lugar la reacción.

Las ventajas de utilizar las pilas de combustibles son las siguientes:

- Su buen rendimiento, en torno al 40 o 50 % y con posibilidades de mejora.
- Este rendimiento, a diferencia de otros sistemas, es relativamente alto para distintas potencias en un mismo sistema (es decir funcionando tanto a plena potencia como a cargas parciales), lo que permite ajustar la producción a la demanda sin sacrificar la eficiencia.
- Asimismo, el rendimiento es bueno independientemente del tamaño del sistema (a diferencia de los sistemas térmicos, en los que el rendimiento mejora con el aumento de escala).
- Son sistemas con muy poca inercia, que pueden seguir casi al instante la curva de demanda.
- Tienen un carácter modular, lo que significa por un lado un aumento de la fiabilidad a la vez que una reducción de costes, y por otro que las plantas se pueden construir en poco tiempo y pueden aumentar

o disminuir la potencia sin cambiar su diseño. Además se puede conseguir una muy alta disponibilidad, ya que la parada de un módulo no supondría la parada del sistema completo.

- Al carecer de partes móviles, las pilas de combustible son silenciosas, no producen vibraciones (estas afirmaciones no son válidas para algunos de los componentes auxiliares), y por ello, en teoría, requieren poco mantenimiento.

## 2.3 Historia

La idea original data de 1839, cuando un jurista galés, Sir William Grove (1811 – 1896), diseñó el primer dispositivo. Para su preparación utilizó dos electrodos de platino sumergidos en ácido sulfúrico, que alimentaba con oxígeno e hidrógeno, respectivamente. A partir de la disociación del  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , la reducción tenía lugar en el electrodo alimentado con  $\text{O}_2$  (cátodo), que reaccionaba con los iones  $\text{H}^+$  formando agua; en esta reacción intervenían los electrones, que eran generados en el ánodo durante la oxidación del  $\text{H}_2$ , que reaccionaba con el ion  $\text{SO}_4^{2-}$  para formar ácido sulfúrico. Conectando seis de estos dispositivos en serie, los utilizó como generador eléctrico para descomponer el agua. Posteriormente, otros inventores fueron introduciendo ciertas modificaciones; así, en 1855, Becquerel construyó otra celda que consumía carbono a partir de un electrolito de nitrato fundido (nitrato de potasio) contenido en un recipiente de platino. En 1894, Mond y Langer utilizaron como electrodos unas planchas de platino con pequeños orificios, que recubrieron con negro de platino, usando como electrolito ácido sulfúrico diluido dentro de una matriz porosa denominada paris.

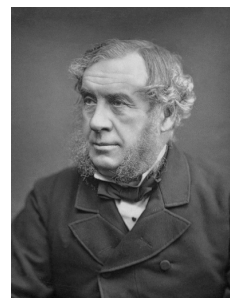


Figura 2.2 William.

Pero el verdadero desarrollo tecnológico de estos dispositivos tuvo lugar, gracias a Francis T. Bacon, ya entrado el siglo XX. En 1952 se construyó una planta de 5 kW basada en la tecnología de hidrógeno/oxígeno que se había desarrollado a partir de 1932. La celda consistía en un ánodo de níquel, un cátodo de óxido de níquel litiado, y un electrolito de hidróxido de potasio concentrado al 85%; operaba a una temperatura de 200-240°C, y a una presión de 30-40 bar que impedía la ebullición del electrolito. Esta pila sirvió como base para desarrollar las fuentes de energía auxiliares de los vehículos espaciales. Pero ha sido debido a la crisis energética mundial que se vivió a partir de 1973, cuando se ha producido un incremento del estudio para el desarrollo de las celdas de combustible.

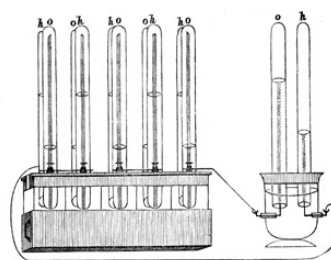


Figura 2.3 Configuración del dispositivo de William R. Grove, según su publicación "On the Gas Voltaic Battery", Philosophical Magazine and Journal of Science (1843) p. 272.

## 2.4 Uso y Aplicaciones

El hidrógeno y las pilas de combustible pueden adaptarse a y aplicaciones muy diversos, tanto para aplicaciones estacionarias como para aplicaciones portátiles o de transporte

El hidrógeno como vector energético brinda la opción de almacenar energía a gran escala, lo que en aplicaciones estacionarias podría traducirse en una evolución hacia un nuevo concepto de gestión de redes eléctricas, en las que los flujos energéticos podrían ser multidireccionales y la generación renovable poco predecible no supondría mayores impedimentos. Previsiblemente, estas aplicaciones estacionarias masivas sean el primer nicho de mercado de las pilas de combustible de alta temperatura, pesadas y con grandes inercias pero con mayor flexibilidad de combustible, vida útil más larga y mejores eficiencias. Aplicaciones estacionarias más pequeñas y de activación rápida son ya comerciales, utilizando sobre todo pilas PEM y orientadas a actuar como generadores de potencia de emergencia en momentos en los que falla el suministro

principal.

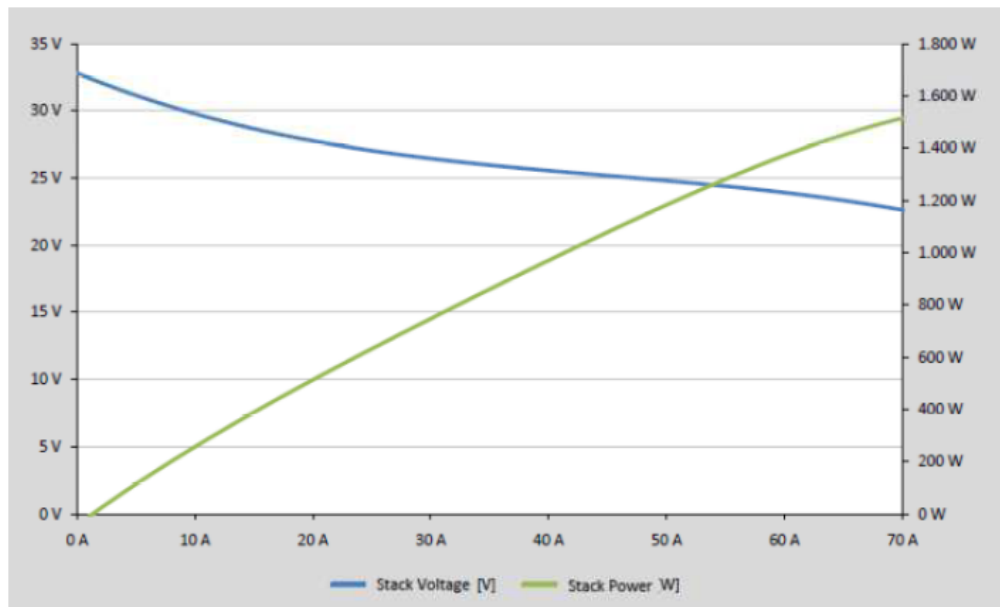
Entre las aplicaciones al transporte, es de esperar que el boom esté liderado por las grandes compañías automovilísticas, que ya han realizado enormes inversiones que difícilmente van a dejar caer así como así. El coche eléctrico con pila de combustible es una aplicación bastante avanzada técnicamente, que solo espera una disminución de costes y el despliegue de las redes de suministro. Para ilustrar las ventajas del vehículo de pila de combustible, resulta muy útil estudiar el caso presente de las carretillas elevadoras de pila de combustible de hidrógeno frente a sus equivalentes eléctricas. Aún resultando significativamente más caras, son un éxito comercial indiscutible: gracias a su autonomía, su potencia constante y sus recargas en pocos minutos, los usuarios estiman que su productividad puede fácilmente doblar la de sus competidoras de baterías, a la vez que liberan valiosos metros cuadrados dentro de los almacenes.

Otras aplicaciones tremendamente interesantes son las portátiles, orientadas a pequeños dispositivos eléctricos, cada vez más abundantes a nuestro alrededor. Los consumos de los modernos smartphones, por ejemplo, ya superan las posibilidades de sus baterías, obligándonos a cargar el teléfono cada día. Los fabricantes de estos y otros dispositivos van también tomando conciencia de las posibilidades de la pila de combustible y la consideran seriamente en sus estrategias comerciales, como se comprueba en los diseños y patentes que son ya de acceso público. Estas aplicaciones se basan en pilas tipo DMFC y tipo PEM, ya sea con almacenamientos en cartuchos desechables o recargables.

## 2.5 PEM NEXA 1200

La Nexa1200 es una pila de combustible de construcción totalmente integrada, pertenece a una generación de módulos basados en los stack FC GenTM 1020 ACS de Ballard. Todas las interfaces se encuentran situadas en la parte trasera de la carcasa. El sistema comunica mediante un bus CAN, la puesta en marcha se realiza mediante software propio.

A continuación se muestra la curva de polarización teórica aportada por el fabricante:



**Figura 2.4** Curva de Polarización NEXA 1200 Teórica.

Según el fabricante de la pila de combustible las características técnicas iniciales son:



**Tabla 2.1** Características Técnicas de la Fuel Cell.

Designación	Definición	Especificación
Datos físicos	Dimensiones (H x W x D)	220 x 400 x 550 mm
	Peso	22 kg
	Tipo de protección	IP22
Potencia de salida	Tensión de salida	20... 36 VDC
	Corriente nominal	65 ADC máximo.
	Salida nominal	1200 W a 5 ... 25°C
	Salida nominal	1000 W a 35°C
Combustible		H2, gas de hidrógeno
	Pureza mínima	4.0 (= 99,99 %)
	Entrada de presión permitida	1 ...15 bar
	Consumo de Hidrogeno en 1200 W	15 NL / min
Suministro eléctrico	Potencia mínima de entrada	110 WDC
	Fuente de alimentación	12...36 VDC
Oxidante	Oxígeno	Oxígeno atmosférico
	Caudal de volumen	Max 335 m3 / h
	La concentración de oxígeno	Min 18%
	Presión ambiental	700... 1100 mbar
	Temperatura	5... 35 °C
	Agua en forma de vapor contenido en los gases de escape a potencia nominal	550 g / h
Entorno operativo	Ubicación de funcionamiento	Seca, interior de laboratorios
	Temperatura ambiente	5... 35°C
	Humedad relativa	0...95%, sin condensación
Almacenamiento	Temperatura ambiente	3...30°C
Transporte	Temperatura ambiente	-40...+70°C



## 3 Montaje de la Bancada

---

*La mente es igual que un paracaídas, solo funciona si se abre.*

ALBERT EINSTEIN

En este capítulo se explicará cómo se ha llegado a la configuración final de nuestra bancada, así como un esquema de ésta con todos sus elementos.

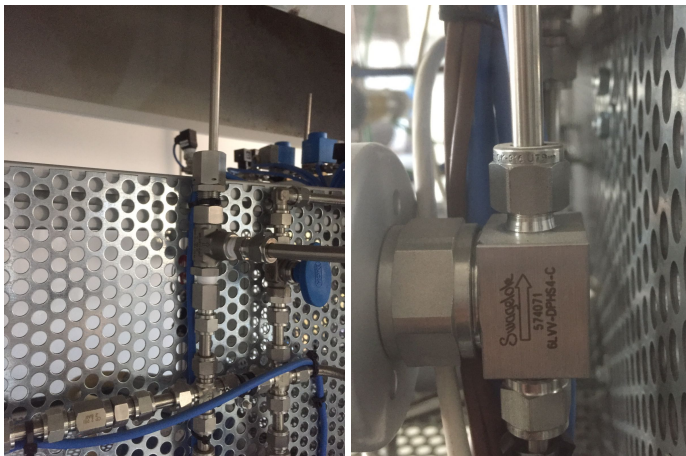
### 3.1 Introducción

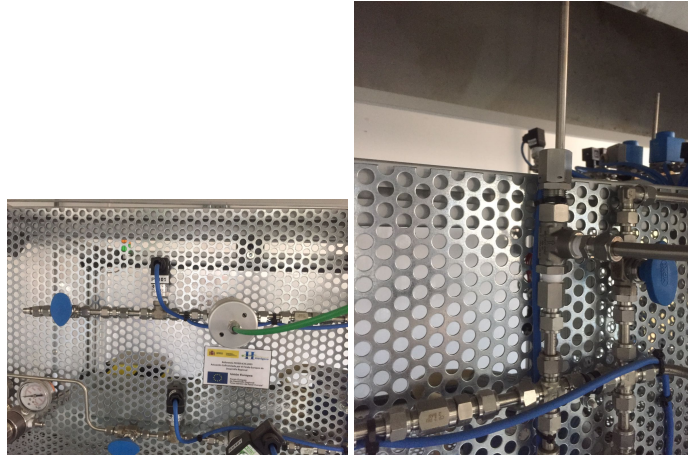
Para la realización del montaje de la bancada se realizó una búsqueda de trabajos fin de grado, tesis o cualquier documento en el que se explicase cómo realizar dicho montaje. En esta búsqueda se llegó a la página del Centro Nacional del Hidrógeno, situado en Puertollano. Se visitó dicho centro con el objetivo de ver una bancada de hidrógeno para tomarla como ejemplo y aprender sobre ella. En dicho centro se aclararon dudas como el tipo material de las tuberías, que sería acero inoxidable debido a su durabilidad y seguridad.



**Figura 3.1** Centro Nacional del Hidrógeno.

En el centro se tomaron las siguientes fotos para que sirviesen de ejemplo a la hora de realizar nuestra propia bancada:





**Figura 3.2** Montaje CNH.

En las fotos se pueden observar cómo se realizan las uniones y las conexiones.

Una vez conocido todo el material necesario se pasó a la búsqueda de materiales en la página de Swagelok para realizar un presupuesto. Dado que no se encontró todo el material necesario nos pusimos en contacto con la empresa Iberfluid, a la que finalmente se le realizó el pedido de todo lo necesario.

### 3.2 Material Necesario

A continuación se detalla el material necesario para la realización de la bancada:

- Medidor de caudal másico de gas por efecto térmico X 1



**Figura 3.3** Medidor de Caudal Másico.

- Regulador de presión en línea X 1



**Figura 3.4** Regulador de Presión.

- Conector en T para transductor de presión X 1



**Figura 3.5** Conector en T para Transductor de Presión.

- Metro tubing en AlSi316L. Tamaño: 1/4" O.D. x 0,89 mm pared. X 6 metros



**Figura 3.6** Tubbing.

- Válvula de bola X 2



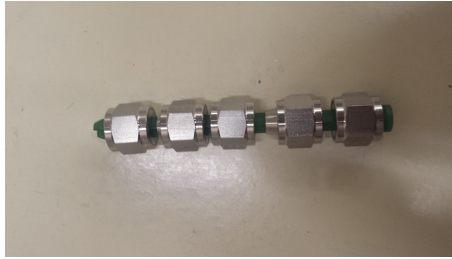
**Figura 3.7** Válvula de Bola.

- Espiga conector rápido X 2



**Figura 3.8** Espiga.

- Cargador nuts y ferrulas GYR. 1/4"-5 Conjuntos X 6



**Figura 3.9** Nuts y Ferrulas.

- Conector en T X 2



**Figura 3.10** Conector en T.

- Transductor de presión STW X 1



**Figura 3.11** Transductor dde Presión.

- Unión en codo X 2



**Figura 3.12** Unión en Codo.

- Botellas de hidruro X 2



**Figura 3.13** Botellas de Hidruro.

- Pila PEM X 1



**Figura 3.14** Pila PEM.

- Electroválvula de la PEM X 1



**Figura 3.15** Electroválvula.

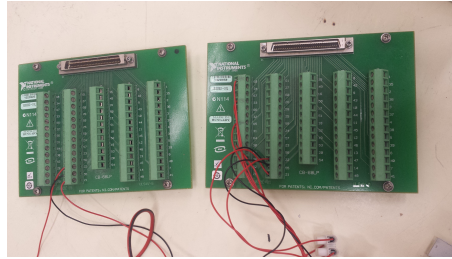
- Convertido DC/DC X 1



**Figura 3.16** Convertidor DC/DC.

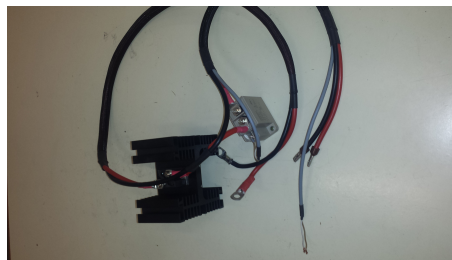
- Tarjeta CB-68LP-National Instrument X 2





**Figura 3.17** Tarjeta CB-68LP.

- Relé X 1



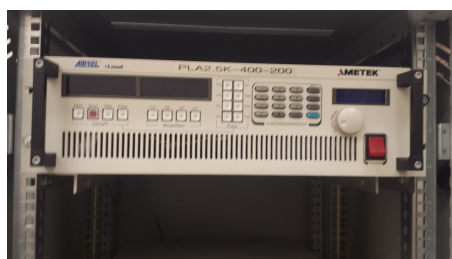
**Figura 3.18** Relé.

- Baterías X 5



**Figura 3.19** Baterías.

- Carga X 1



**Figura 3.20** Carga.

- Fuente X 1



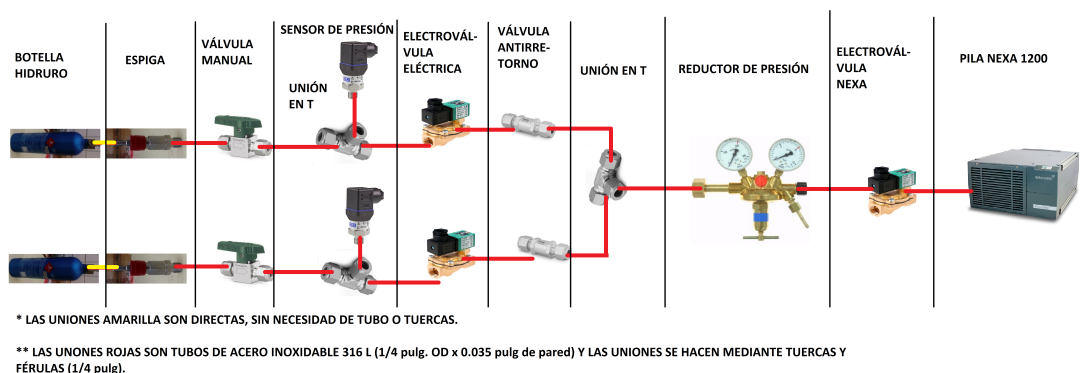


**Figura 3.21** Fuente.

### 3.3 Montaje Teórico

El montaje que se muestra a continuación se trata de un montaje teórico, es decir, la finalidad del montaje de esta bancada es integrarla en el coche eléctrico que tiene el departamento, luego, las medidas de los tubos, la disposición de los diferentes elementos y todas las conexiones vendrán condicionadas por el espacio disponible en dicho coche.

El esquema siguiente muestra la distribución inicial, tras la visita al Centro Nacional del Hidrógeno:



**Figura 3.22** Esquema Inicial.

Dicho esquema se pensó para que se pudiesen utilizar ambas botellas independientemente, siendo controladas por el sensor de presión. De esta forma se podría elegir si se quería que trabajasen las dos botellas juntas o cada una por separado, así como cerrar la botella que se desease en caso de que la presión de salida fuese más baja de la deseada. Este primer diseño, como se puede observar, era demasiado caro, ya que todo el sistema era doble, lo mismo para la línea de cada botella.

Tras una una comunicación con el INTA, en la que se les explicó lo que se quería hacer y se les envió el primer esquema inicial, se llegó al siguiente diseño:

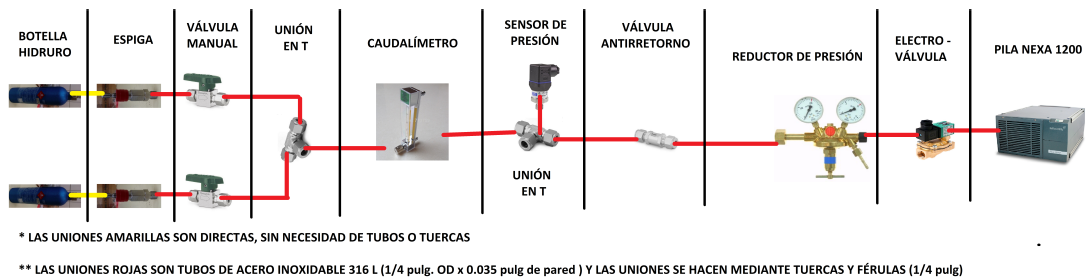


Figura 3.23 Segundo Esquema.

En este esquema se observa cómo se han reducido elementos como los sensores de presión y válvulas antirretorno. También se puede ver cómo se ha introducido un caudalímetro, necesario para líneas futuras de investigación, como puede ser el cálculo de las pérdidas de carga de nuestro sistema.

Finalmente se eliminó la válvula antirretorno por su nula utilidad. Para que quede claro el montaje se mostrará por separado el montaje de la pila con el hidrógeno y por otro, el de la pila con el sistema de potencia:

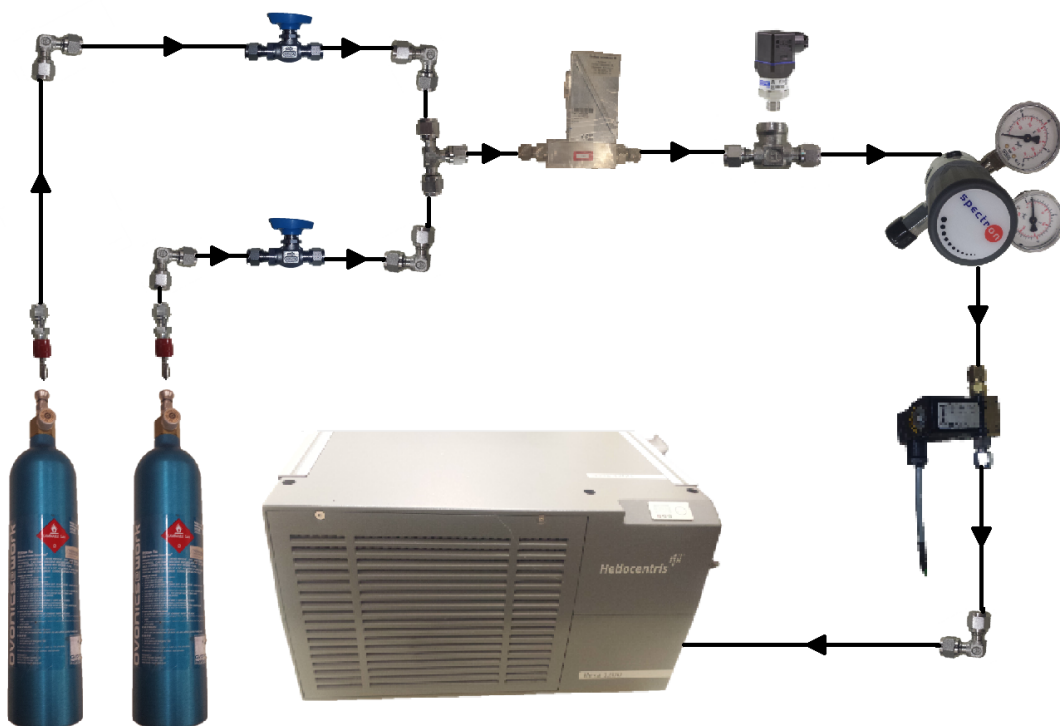
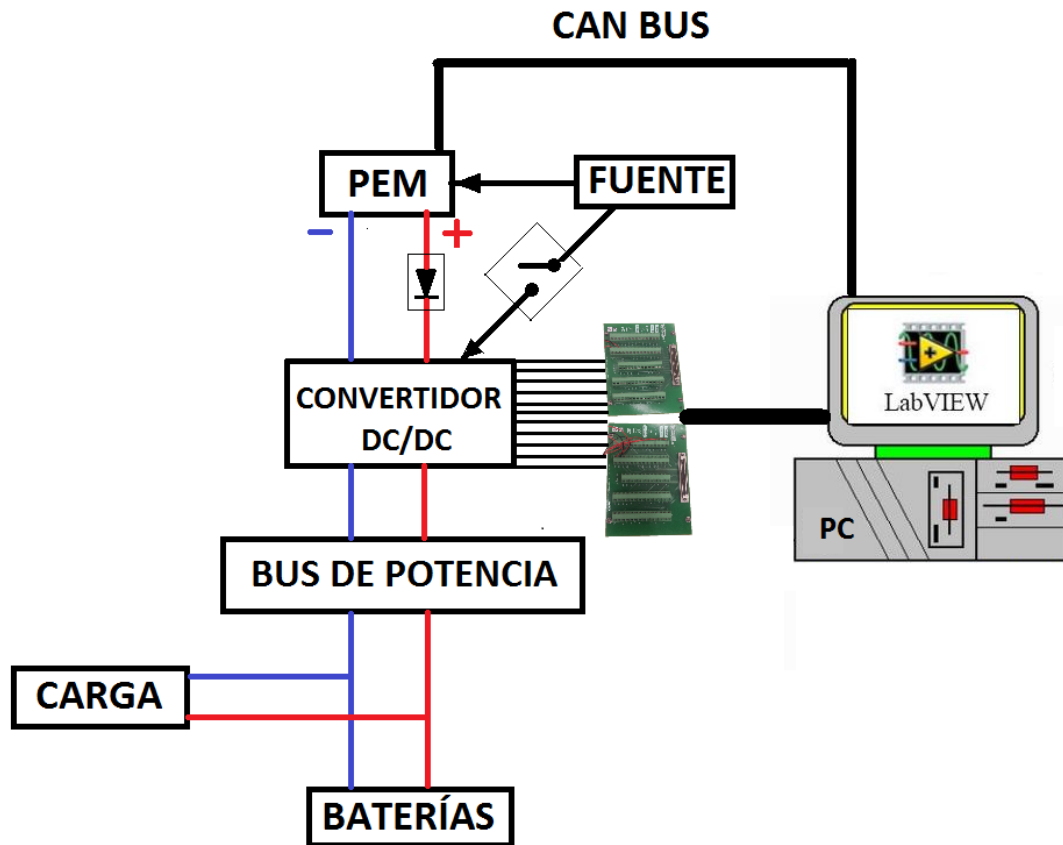


Figura 3.24 Instalación de Hidrógeno.

En la figura no se aprecia la distribución de las botellas, pero cuando se haga real, las botellas se deberán de colocar en el lado de las rejillas de la pila, para aprovechar el calor que esta desprende, ya que como se explicará en el siguiente punto, las botellas al descargarse se enfrían y por tanto, si se calientan, se vacían con mayor facilidad.

Una vez conocida la distribución de la parte de los hidruros, se pasa a conocer la distribución de la parte de potencia y datos:



**Figura 3.25** Instalación de la parte de Potencia y de Datos.

El relé que se ve entre la fuente y el convertidor es excitado por la tarjeta, dependiendo de las referencias que le lleguen. Así mismo, la tarjeta tiene 7 cables, 4 entradas analógicas, 4 salidas analógicas y dos señales, una de ON, para que el convertidor se encienda y otra de RUN para que este se ponga en funcionamiento y comience a demandar potencia a la PEM.



## 4 Botellas de Hidruro

---

*Lo que sabemos es una gota de agua, lo que ignoramos es el océano.*

ISAAC NEWTON

**E**n el siguiente capítulo se detalla toda la información referente a las botellas de hidruro con las que se han trabajado, así como el proceso de llenado llevado a cabo.

### 4.1 Introducción

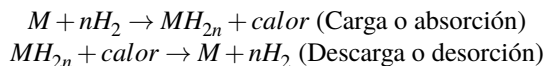
El almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos representa la forma más segura de almacenar el hidrógeno, es fiable pero puede ser muy cara. La base del método consiste en que ciertos metales y aleaciones metálicas tienen la propiedad de formar enlaces covalentes reversibles cuando reaccionan con el hidrógeno, formando lo que se conoce como hidruros metálicos, que se descomponen cuando se calientan liberando el hidrógeno. El hidruro se forma sometiendo un determinado metal a una presión elevada de hidrógeno, lo que ocasiona que el metal, como si fuera una esponja, atrape átomos de hidrógeno en su estructura cristalina. Basta luego disminuir la presión exterior para que el metal libere el hidrógeno. Los hidruros tienen la importante propiedad de que pueden utilizarse para almacenar hidrógeno durante muchos ciclos de asociación-disociación, sin que disminuya su capacidad de almacenamiento. Los tanques de metal-hidruro, por tanto tienen en su interior una aleación capaz de absorber hidrógeno, el cual más tarde se recupera aportando calor. Los hidruros metálicos llevan una proporción del 1-7 % en peso de hidrógeno. En metales como el titanio, la concentración de hidrógeno por unidad de volumen es más alta que en el hidrógeno líquido.

El uso de este seguro y eficiente sistema de almacenamiento depende de identificar un metal con suficiente capacidad de absorción operando en el rango apropiado de temperatura. Más de 200 aleaciones diferentes se han estudiado siendo las más adecuadas las del grupo V de los metales de transición, tanto por su capacidad de almacenamiento como por su precio, su no decrepitación y la baja temperatura que se necesita para disociar el hidruro. Otros compuestos orgánicos que pueden liberar hidrógeno por reacciones de reformado pueden ser considerados también como hidruros, tal es el caso del metano, el metanol y el metilciclohexano.

La alta capacidad de los hidruros metálicos requiere altas temperaturas (300- 350°C) para liberar hidrógeno. Así el hidrógeno puede almacenarse en forma de hidruro a altas densidades por simple compresión, se almacena generalmente a presiones entre 3 y 6 MPa. Ciertos metales apropiados permiten espacios donde los átomos de hidrógeno pueden situarse. El calentamiento del hidrógeno libre, cuando ocurre la absorción del hidrógeno, tiene que eliminar el hidruro almacenado para evitar producir daño sobre los contenedores de almacenamiento. Los hidruros a altas temperaturas (niveles de temperaturas a las cuales el hidrógeno empieza de nuevo el proceso de disociación) son más eficientes que los hidruros a bajas temperaturas. Los hidruros a bajas temperaturas se suelen usar en aplicaciones de automóviles (porque solamente el calor inútil a baja temperatura está disponible para refrescar el motor). Las investigaciones están desarrollando sistemas de hidruros metálicos a baja temperatura, que puede almacenar de 3 a 5 % de hidrógeno

(de densidad gravimétrica). Recientemente han comenzado experimentos con hidruros a temperaturas medias.

El proceso se refleja mediante las siguientes reacciones químicas, el calor se libera cuando se forma el compuesto (reacción exotérmica de absorción), y el calor debe suministrarse para liberar el hidrógeno (reacción endotérmica de desorción):



Donde M representa el metal, elemento o aleación.

El problema de los tanques de metal-hidruro es doble: además de necesitar el aporte de energía para recuperar el hidrógeno, como se ha dicho, el rendimiento de los mismos no es del 100%, es decir, no es recuperable todo el hidrógeno que se introduce en los mismos.

## 4.2 Ovonic 85G555B

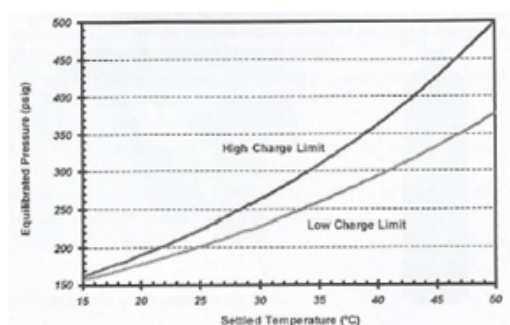
Para el estudio realizado se ha trabajado con botellas de hidruro de la marca Ovonic y modelo 85G555B dada las ventajas ya citadas sobre el uso del almacenamiento de hidrógeno en hidruros.

El hidrógeno se almacena con la tecnología de hidruros metálicos; en el laboratorio hay dos botella de Sistema de Ovonic-Hidrógeno como se muestran a continuación:



**Figura 4.1** Botella de Hidruro.

Las botellas requieren hidrógeno 5,0 (es decir, una pureza mayor de 99,999% o menos impurezas que 1 ppm). El cilindro, hecho de aluminio, se llena con hidruros de aleaciones de metales; la botella contiene: hidrógeno, cromo, hierro, manganeso, vanadio, titanio, circonio, aluminio y estaño. La adsorción de hidrógeno es un proceso exotérmico por lo que hay liberación de calor al medio ambiente, mientras que la descarga es un proceso endotérmico, por lo tanto, absorbe calor del medio ambiente. Como puede verse en la figura 4.2 izquierda, la presión de hidrógeno en la botella aumenta con la temperatura en el tanque. Durante la fase de carga, la presión aumenta cuando aumenta la temperatura y para impedir que se llegue inmediatamente a la presión máxima de la botella y que no se pueda realizar la carga completa, las botellas se introducen en un baño de agua a temperatura ambiente (figura 4.2 derecha), durante la fase de descarga, cuando



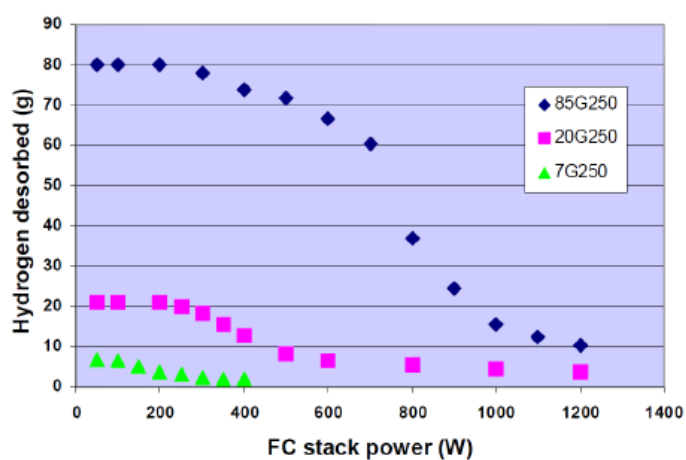
**Figura 4.2** a) Presión vs Temperatura, b) Refrigeración en la carga.

tienen que alimentar a las células, la botella se enfría y para mantener la alta presión se utiliza un sistema que calienta la botella (figura 4.3).



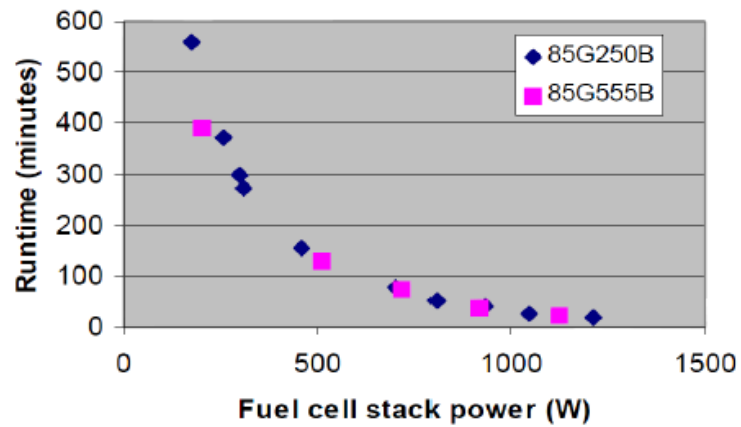
**Figura 4.3** Calentamiento en la Descarga.

La siguiente gráfica muestra el rendimiento de las botellas durante la fase de descarga usando una celda de combustible PEM con flujo de aire a temperatura ambiente que sopla sobre la superficie de la botella:



**Figura 4.4** Rendimiento de las Botellas durante la Descarga.

En el siguiente gráfico se muestra la comparación entre los tiempos de descarga de dos botellas en función de la potencia requerida por la célula; el rendimiento es muy parecido.



**Figura 4.5** Comparación en la Descarga de dos Botellas.



### 4.2.1 Llenado de las Botellas

Para el llenado de las botellas de hidruro, la única información que se tenía era el datasheet de dichas botellas que se muestra a continuación:



Shown with optional quick-connect coupling.  
Actual appearance may vary.

Technical Specifications		
	Standard high-capacity model 85G250B-NPT	International "air-shippable" model 85G555B-NPT
Hydrogen storage capacity, nominal	80 grams / 900 std. liters (condition dependent)	68 grams / 760 std. liters (condition dependent)
Diameter	3.5 in. / 89 mm	
Length	15.1 in. / 384 mm (16.5 in. / 419 mm w/ coupling)	
Weight	14 lbs. / 6.5 kg	
Rated discharge	6 slpm / 600 watts	
Re-filling	Charges in approximately 8 hours at 250psig in flowing ambient air.	
Operating temperature	32-167°F / 0-75°C	
Storage temperature	-20-130°F / -29-54°C	
		*for air shipment, all hydrogen must be desorbed. Cargo aircraft only.

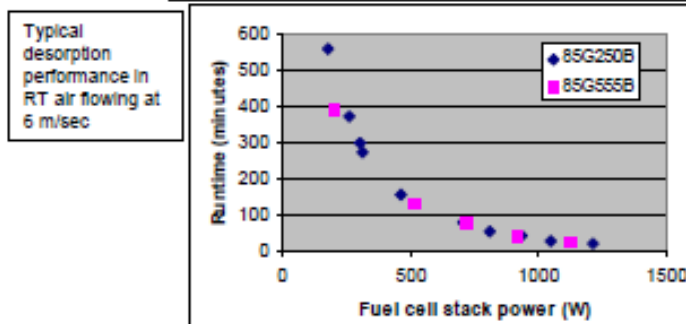


Figura 4.6 Data Sheet.

En él se puede leer que la carga debe de hacerse durante 8 horas a una presión de 250 psig. Dichos valores parecían muy altos para dicho llenado por lo que se investigó otra forma de hacerlo, buscando si alguien había documentado dicho llenado. Dado que no se encontró nada se decidió realizar dos tipos de carga, ya que teníamos dos botellas. La primera se realizó poco a poco, aumentando cada cierto tiempo la presión de entrada a la botella. La otra se hizo a presión máxima durante las 8 horas. Como ya se ha comentado, el datasheet indica que el llenado debe de hacerse a 250 psig, que son unos 17,024 bar. Dada las limitaciones de las instalaciones con las que se han podido trabajar, la presión máxima alcanzada por el regulador de presión del laboratorio fue de 15 bar. A continuación se detalla por separado el llenado de cada botella, así como el cálculo de la cantidad de hidrógeno introducido en cada botella, sirviendo dicho cálculo como comparación entre que sistema de llenado resulta más eficiente y mejor para futuros llenados.

A continuación se detallan los pasos seguidos para realizar el llenado de las botellas de hidruros:

1. Se vacía el hidrógeno que pueda quedar en la botella de hidruro. Es recomendable aplicar calor para que el hidrógeno se expulse con mayor facilidad.
2. Se coloca la botella de hidruro en la instalación, asegurándose de que queda bien instalada.
3. Se abre la llave de paso que tienen las botellas de hidrógeno puro que se encuentran fuera del laboratorio y purgamos la línea, para asegurarnos de que la línea se encuentra llena de hidrógeno.



**Figura 4.7** Botellas de Hidrógeno Puro.

4. Se abre la llave de paso de la tubería que va hacia el interior del laboratorio y miramos la presión que tiene la botella con la que vamos a realizar la carga, para una vez terminada la carga volver a revisar la presión de ésta y con la diferencia poder calcular la cantidad de hidrógeno utilizado en la carga.



**Figura 4.8** Línea exterior.

5. Una vez en el laboratorio se comprueba que no existen pérdidas en nuestro sistema con un aparato específico para ello.



**Figura 4.9** Comprobación de Fugas de Hidrógeno.

6. Antes de comenzar la carga se tienen que abrir las ventanas de la zona de carga, para ventilar dicha zona y evitar que se acumule el hidrógeno en caso de que se produzca una fuga.
7. Se introduce la botella de hidruro a cargar en un cubo con agua, si puede ser con hielo, ya que la adsorción de hidrógeno es un proceso exotérmico por lo que hay una liberación de calor al medio ambiente. Al aumentar la temperatura de la botella también lo hace la presión de ésta, por lo que refrigerándola se consigue que dicha presión de carga se mantenga constante.



**Figura 4.10** Refrigeración en la Carga.

8. Se abre la llave de paso que permite el paso de hidrógeno de la tubería al manómetro.
9. Se abre la botella de hidruro que queremos llenar y se observa en el manómetro a qué presión se encuentra la botella.



**Figura 4.11** Manómetro y Llave de Paso en el Interior del Laboratorio.

10. A partir de este punto se puede realizar la carga de dos formas, subiendo poco a poco la presión que le entra a la botella de hidruro o realizar la carga directamente a la presión de 15 bar durante 8 horas. Se debe realizar la carga con 17 bar, pero la instalación del laboratorio no lo permite.
11. Una vez transcurridas las 8 horas, se realiza el proceso inverso cerrando las válvulas que se habían abierto para la carga en el orden contrario llevado a cabo para su carga.

Durante la carga se tiene que ir comprobando cada ciertos minutos que no existe ningún tipo de fuga, en el caso de que la hubiese, se tendría que terminar la carga, cerrando todas las válvulas y alejarse de la zona hasta que la fuga se estabilizase.

#### **Botella 1**

En esta primera botella se ha realizado la carga subiendo poco a poco la presión con el regulador y esperando a que la botella se estabilizase, es decir, se enfriase un poco, ya que como se ha comentado anteriormente, en la carga, se produce calor. A continuación se muestra una tabla con las presiones y tiempos medidos en el laboratorio durante la carga:

PRESIÓN (bar)	TIEMPO (min)
1	5
2	10
3	5
4	5
5	5
6	10
7	5
8	5
9	10
10	30

La primera carga de esta botella quedó incompleta, ya que en la instalación perdimos algo de tiempo que al final se nos echó encima y nos impidió seguir con la carga. Al día siguiente comenzamos a realizar la carga otra vez, de la misma manera, obteniendo la siguiente tabla:

PRESIÓN (bar)	TIEMPO (min)
4	0
5	10
6	5
7	5
8	5
9	5
10	5
11	5
12	20
14	65
15	60

Los 4 bar reflejan la carga que tenía la botella de hidruros tras la carga del día anterior.

En esta última carga se paró el proceso antes de cumplir las 8 horas porque el depósito, el cuál suministraba el hidrógeno, no variaba su presión, por lo que se dedujo que la botella de hidruro ya no estaba admitiendo más carga.

Una vez terminado el proceso se apuntó la presión final de las botellas grandes hidrógeno del exterior, obteniendo una diferencia entre la inicial y final de 15 bar.

Una vez realizada la carga se puede calcular la cantidad de hidrógeno introducido en la botella de hidruro mediante la diferencia entre los moles iniciales y finales de la botella exterior. Para realizar dichos cálculos se han realizado algunas hipótesis:

- Dado que se trata de un gas y el depósito es rígido se supone que  $V = \text{cte}$ , es decir el volumen de la botella de llenado no varía en la carga.
- La temperatura no varía en nuestro proceso de llenado ya que el volumen de la botella de hidrógeno exterior es mucho mayor que las botellas de hidruros.

Con dichas hipótesis y utilizando la expresión de los gases ideales se realizan los siguientes cálculos:

$$\frac{P_1 V_1 = n_1 RT}{P_2 V_2 = n_2 RT} \rightarrow \frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

De esta última ecuación se obtendrá  $n_2$  una vez calculado  $n_1$ . El número de moles en la botella de hidrógeno grande al empezar la carga la obtenemos de la expresión de los gases ideales:

$$n_1 = \frac{P_1 V_1}{RT}$$

donde  $P_1 = 75 \text{ bar}$ ,  $V_1 = 50 \text{ L}$ ,  $R = 0,08205746 \frac{\text{atmL}}{\text{molK}}$  y  $T = 30^\circ\text{C}$ . Con estos valores se obtiene que:

$$n_1 = 148,778 \text{ moles} \rightarrow n_1 = \frac{m_1}{M_1} \rightarrow m_1 = 297,556 \text{ g}$$

$$\text{Y por tanto } n_2 = 119,0224 \text{ moles} \rightarrow m_2 = 238,00448 \text{ g.}$$

Realizando la diferencia entre ambas masas obtenemos la cantidad de hidrógeno introducido en la botella de hidruro:

$$m_1 - m_2 = 59,5112 \text{ g.}$$

$$m_{T1} = 59,5112 \text{ g}$$

**Botella 2**

El llenado de esta botella ha sido durante 8 horas a una presión de 15 bar, la máxima conseguida con la instalación disponible en el laboratorio. Se comenzó con una presión menor para que no fuese tan repentino. A continuación se muestra en una tabla la presión y el tiempo transcurrido en cada secuencia:

PRESIÓN (bar)	TIEMPO (min)
5	5
10	5
15	480

Realizando los mismos cálculos que en el apartado anterior y teniendo en cuenta que  $P_1 = 60$  bar y  $P_2 = 40$  bar, se obtiene que:

$$m_{T2} = 79,348g$$

Dado que la carga máxima admisible por la botella de hidruro con la que se está trabajando es de 68 g, se deduce que las hipótesis llevadas a cabo no son del todo correctas ya que en la carga de la segunda botella se obtienen unos resultados mayores a los admisibles, sin embargo, dichos cálculos son válidos para llegar a la conclusión de que la carga correcta es aquella en la que la botella de hidruro se carga durante 8 horas seguidas a 15 bar, tal y cómo describía su datasheet.

## 5 Desarrollo del Controlador de la PEM para la Bancada

---

*El fracaso es, a veces, más fructífero que el éxito.*

HENRY FORD

En este capítulo se presenta el algoritmo realizado en LabView para el control de la pila. En el algoritmo se ha programado el encendido de la pila en función de la carga de las baterías.

### 5.1 Requisitos para el Diseño del Controlador

La pila Nexa 1200 genera una potencia máxima de 1200 W, por lo que no es suficiente para trabajar con ella como única fuente de potencia, ya que el objetivo final del PEM es instalarla en el coche eléctrico FOX que se encuentra en el laboratorio. Dicho coche tiene 4 ruedas y en cada una de ellas se encuentra un motor que consume una potencia máxima de 7,5 KW, por lo que se deduce que el funcionamiento de dicho coche mediante la PEM es imposible. Por ello, la finalidad de la PEM será aumentar la autonomía de las baterías.

La pila puede trabajar con una potencia máxima de 1200 W, pero en su régimen óptimo trabaja a 600 W, ya que a esta potencia la PEM es más eficiente.

La pila funcionará cuando la tensión de las baterías baje de un valor determinado. Este valor es aquel en el cual empiezan a sufrir las baterías, a partir de un 20% de su carga. Para el estudio teórico se considera como voltaje mínimo 76,8 V. Por otro lado, la carga de las baterías también tienen un límite superior, este es de 90 V.

### 5.2 Descripción del Algoritmo Diseñado

Se comenzará con la explicación del algoritmo finalizando con imágenes de éste.

Para la realización del algoritmo se tuvo que pensar bajo que circunstancias sería bueno que la pila se encendiese para aumentar la autonomía de las baterías. En un principio se pensó en controlar el encendido de la pila mediante el control de la carga de las baterías, es decir, de la tensión y de la intensidad que demandaban las ruedas y el resto de sistemas a dichas baterías. Se comenzó a trabajar con estas dos restricciones pero al final se llegó a la conclusión que controlando la intensidad podría darse el caso en el que la pila estuviese encendiéndose y apagándose en intervalos cortos de tiempo, algo que no era recomendable, por ello se optó por realizar el control mediante la tensión.

Como ya se ha comentado anteriormente, la tensión crítica por debajo de la cual las baterías comienzan a sufrir es 76,8 V, por lo que para nuestro algoritmo se ha tomado un valor superior. Teniendo en cuenta las

posibles variaciones de tensiones en poco tiempo debidas a la conducción y preguntando a Juan José por su experiencia, se ha tomado el valor límite de 80 V. Es decir, cuando las baterías se encuentren en una carga de 80 V la pila debe de encenderse. Con el encendido conseguimos que las baterías se carguen y aumenten así su autonomía.

La cuestión que surgía ahora era cuando apagar la pila. Dado que lo que se busca es aumentar la autonomía de la batería, se pensó que lo ideal sería cargarlas por completo, es decir, una vez que las baterías se encontrasen a 80 V, la pila se encendería y quedaría así hasta llegar a la carga máxima de éstas, 90 V.

A continuación se detallan las características del algoritmo:

1. Estando la pila apagada, en OFF, la secuencia que debe de seguir para ponerse en marcha es: OFF → STANDBY → RUN. La pila necesita un tiempo de calentamiento antes de que se ponga a funcionar. Este calentamiento puede llevar entre 1 minuto 35 segundos a 2 minutos 51 segundos. Dicho tiempo varía según la temperatura a la que se encuentre la pila. Por ello, al iniciar el programa, se pasa de OFF → STANDBY y se esperan 3 minutos antes de que empiece a funcionar la pila, es decir, durante tres minutos la pila no se va a encender en el caso de que la carga de las baterías fuese igual o inferior a 80 V. Toda acción sobre la pila también queda anulada, dado que no es recomendable estar encendiéndola y apagándola continuamente y menos en su calentamiento. Cuando se envía el mensaje de STANDBY a la pila se abre la electroválvula que permite el paso de hidrógeno desde las botellas hasta la PEM.
2. Tras el calentamiento se programa un bucle if dominado por un pulsado de STOP, ya que ante cualquier problema dicho pulsador tiene que tener preferencia sobre cualquier acción. En el sistema de la bancada, como ya se ha comentando anteriormente hay un convertidor DC/DC que es el encargado de demandar la potencia a la pila, pues bien, este, junto con la pila tiene una secuencia de encendido y apagado. Para apagar la pila, primero se debe apagar el convertidor, para que así deje de demandar a potencia a la pila y ésta pueda apagarse sin problemas. Así, en el momento en el que se pulsa el STOP, se envía un mensaje de OFF al convertidor DC/DC y después un mensaje STANDBY a la pila, se espera un 1 segundo para que se de una transición y finalmente se envía el mensaje de OFF para que la pila se apague completamente.
3. Otra situación crítica que se debe tener en cuenta y debe ser prioritaria sobre otras, después del pulsador, es la lectura de la presión que le llega a la pila desde las botellas. Dicha presión viene dada por el sensor colocado a la salida de dichas botellas. Si la presión que llega a la pila es igual o inferior a 3 bar, la pila se debe de parar, ya que la pila no puede trabajar por debajo de ese valor. Por encima también hay un límite, 12 bares. Si se alcanza esta presión se apaga el convertidor y la pila recibe un mensaje de STANDBY.
4. Una vez que ya se han pasado los controles prioritarios se pasa a la lectura del voltaje. En el caso de que éste sea menor que 80 V, se envía un mensaje de RUN a la pila, y se queda encendida hasta que las baterías alcanzan una carga de 90 V. Ahora la secuencia entre la PEM y el convertidor es al revés, una vez que se ha encendido la pila se enciende el convertidor DC/DC, para que así cuando demande potencia, la pila ya se encuentre lista para ello. Una vez que las baterías alcancen una carga de 90 V se apaga el convertidor y se le envía un mensaje de STANDBY a la PEM, ya que el apagado total de la pila sólo se realiza cuando se pulsa STOP, para ahorrarnos el tiempo de calentamiento de la pila en el caso de que se tuviese que poner en marcha otra vez.

Todos los mensajes que se envían en el algoritmo van hacia un programa de comunicaciones que se encuentra en el mismo ordenador en el que se tiene Labview. Este programa se encarga de comunicarse con la PEM y el convertidor DC/DC, indicándoles cuando tienen que funcionar o no. A su vez, la PEM es la encargada de abrir o cerrar la electroválvula para que el entre o no hidrógeno.

Seguidamente se muestra el algoritmo llevado a cabo:



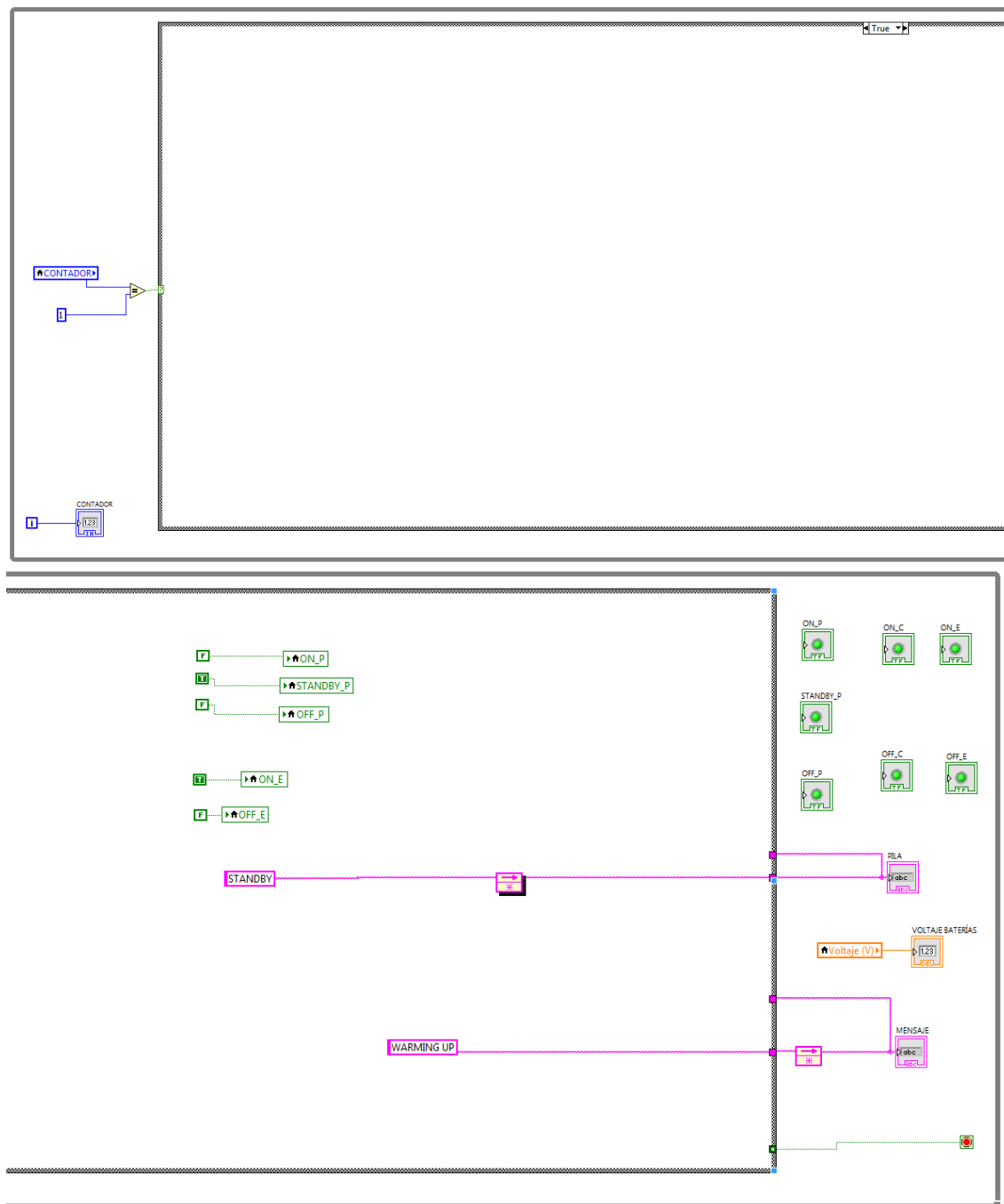


Figura 5.1 Primera Etapa.

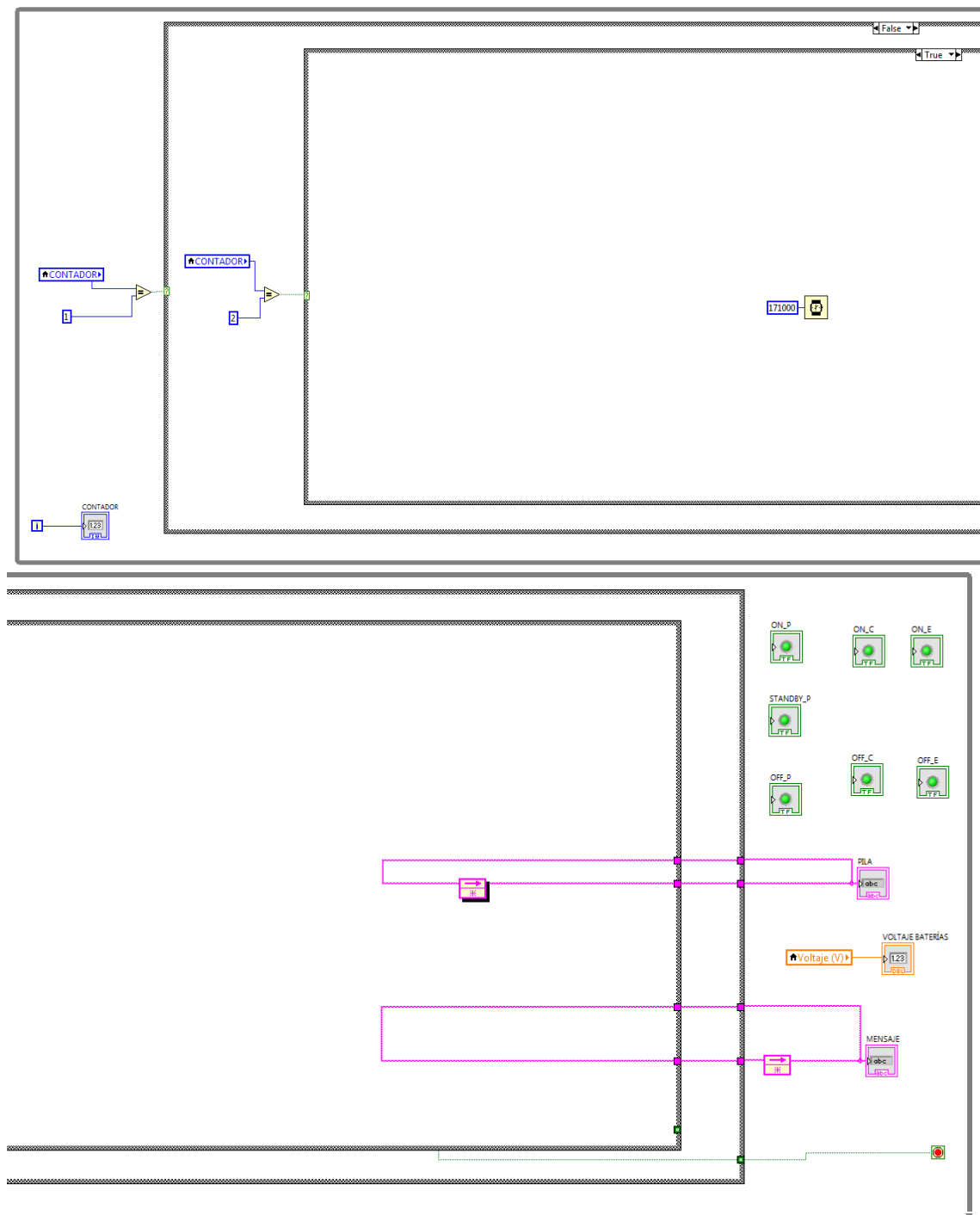


Figura 5.2 Segunda Etapa.

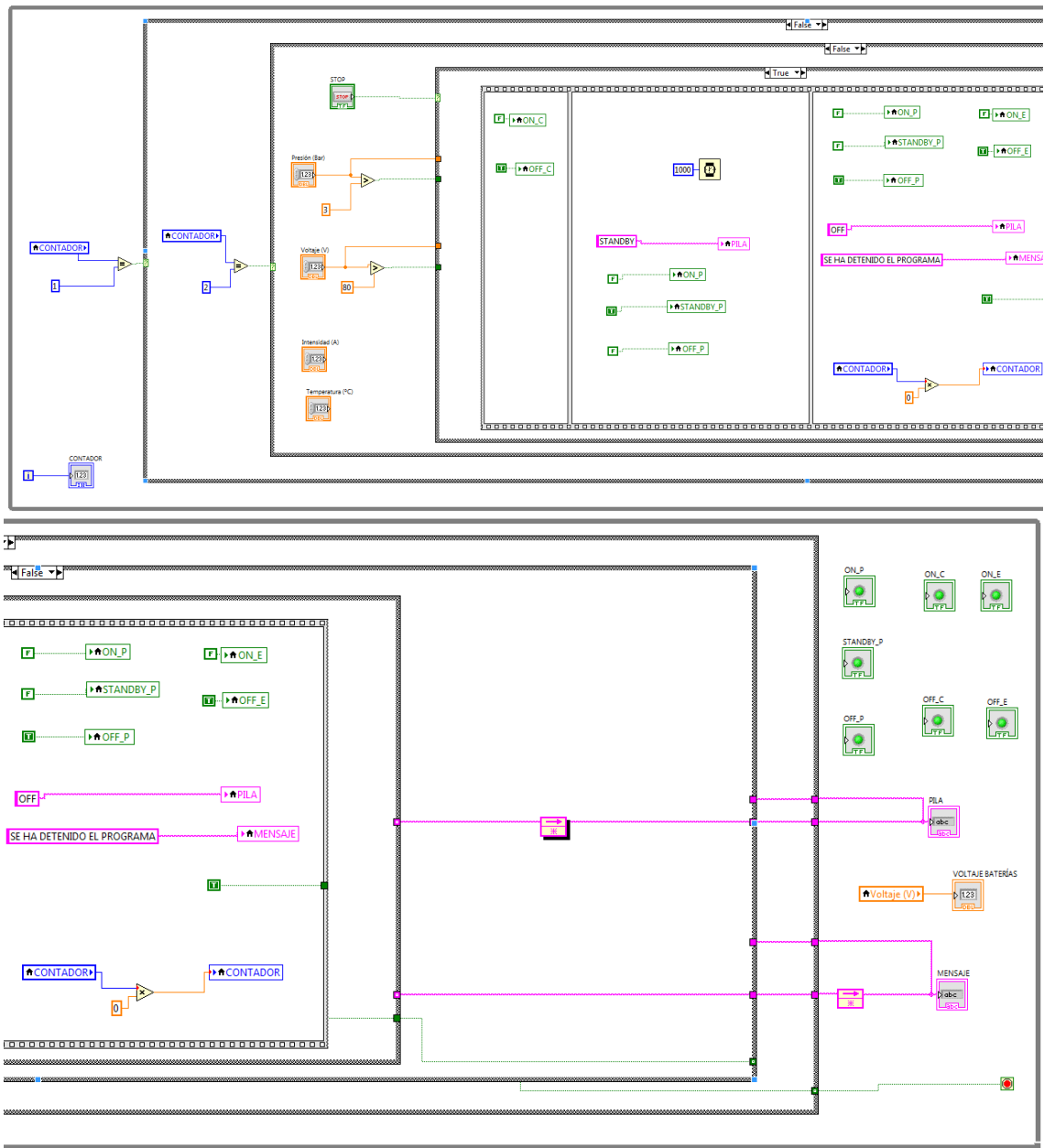


Figura 5.3 Tercera Etapa.

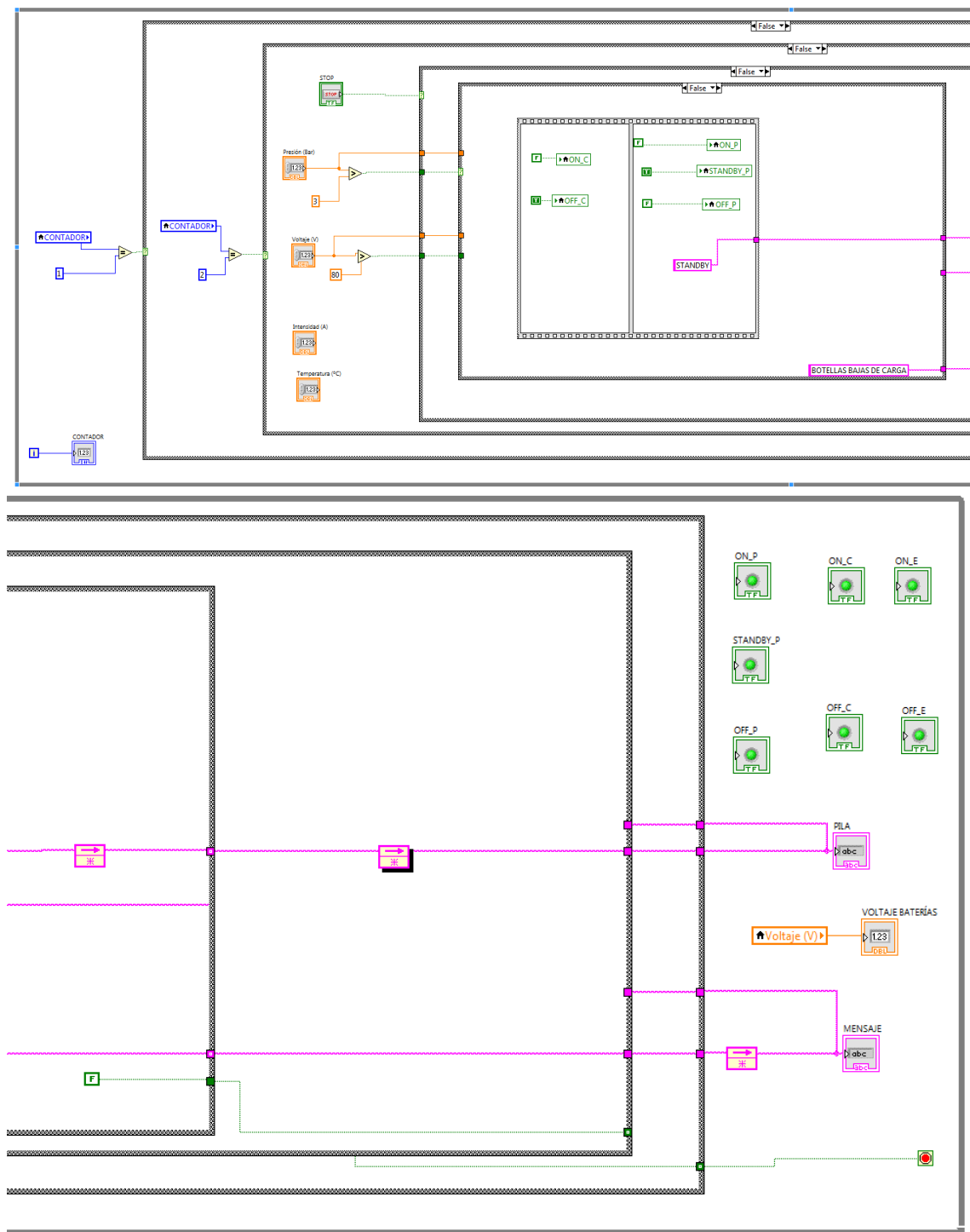


Figura 5.4 Cuarta Etapa.

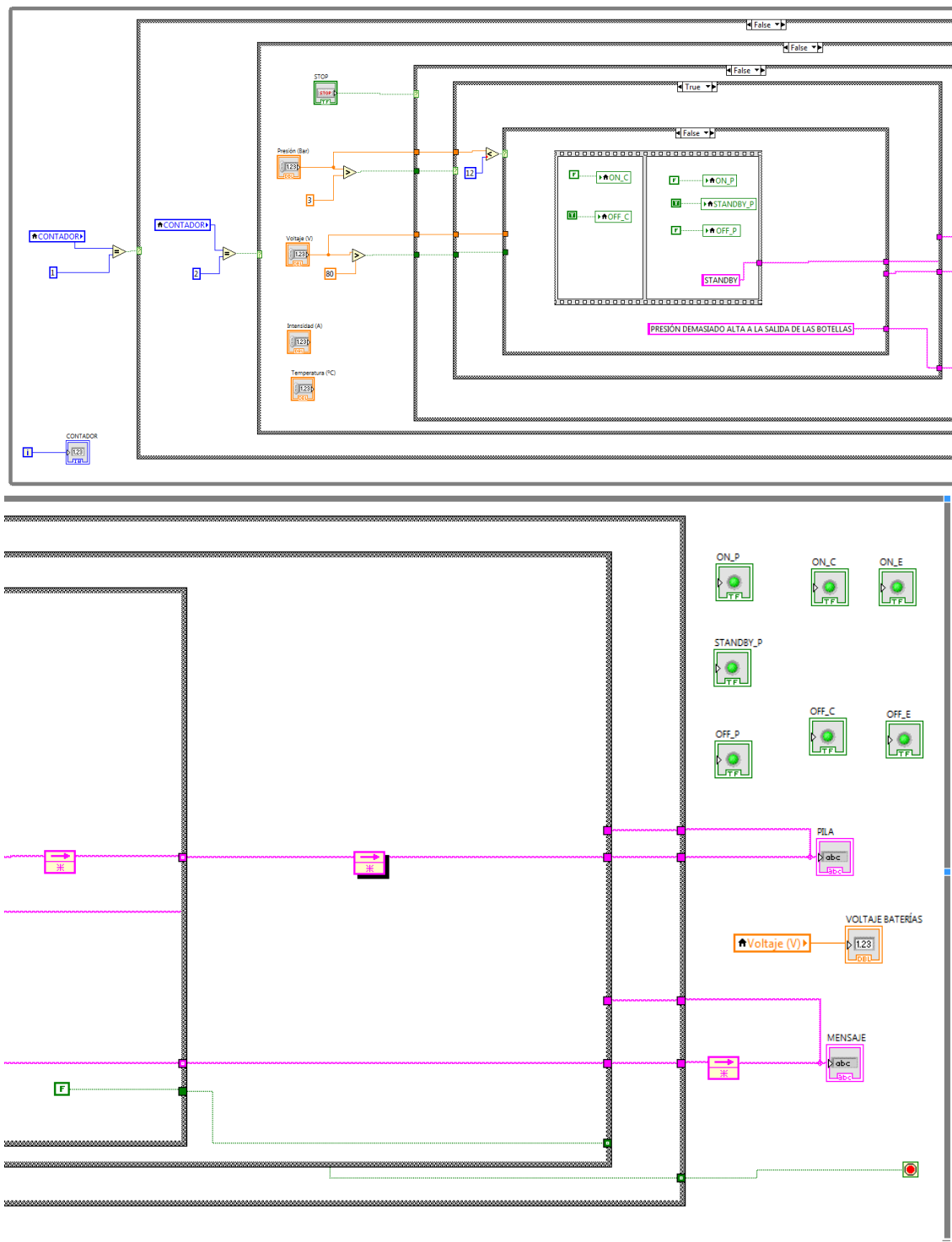


Figura 5.5 Quinta Etapa.

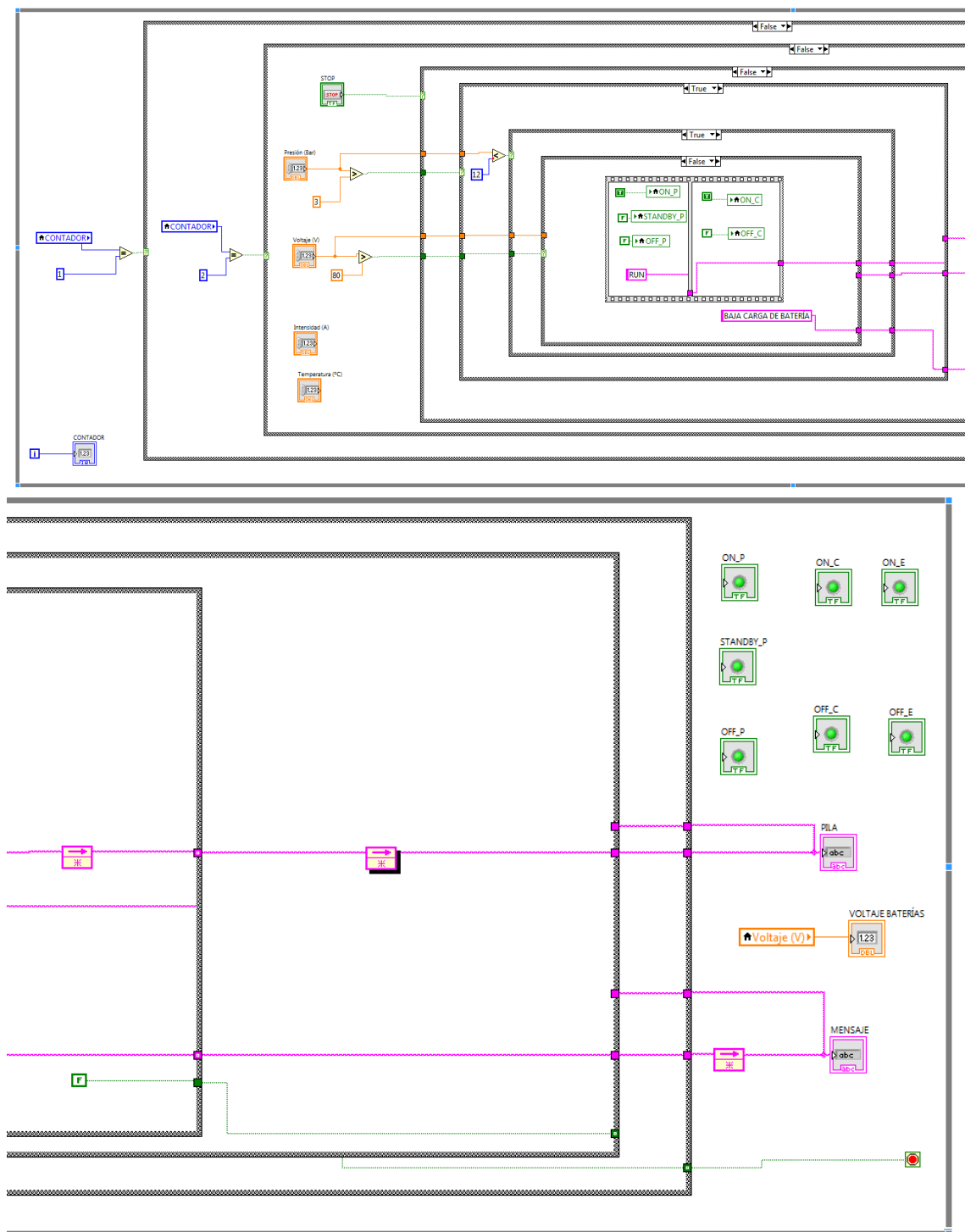


Figura 5.6 Sexta Etapa.

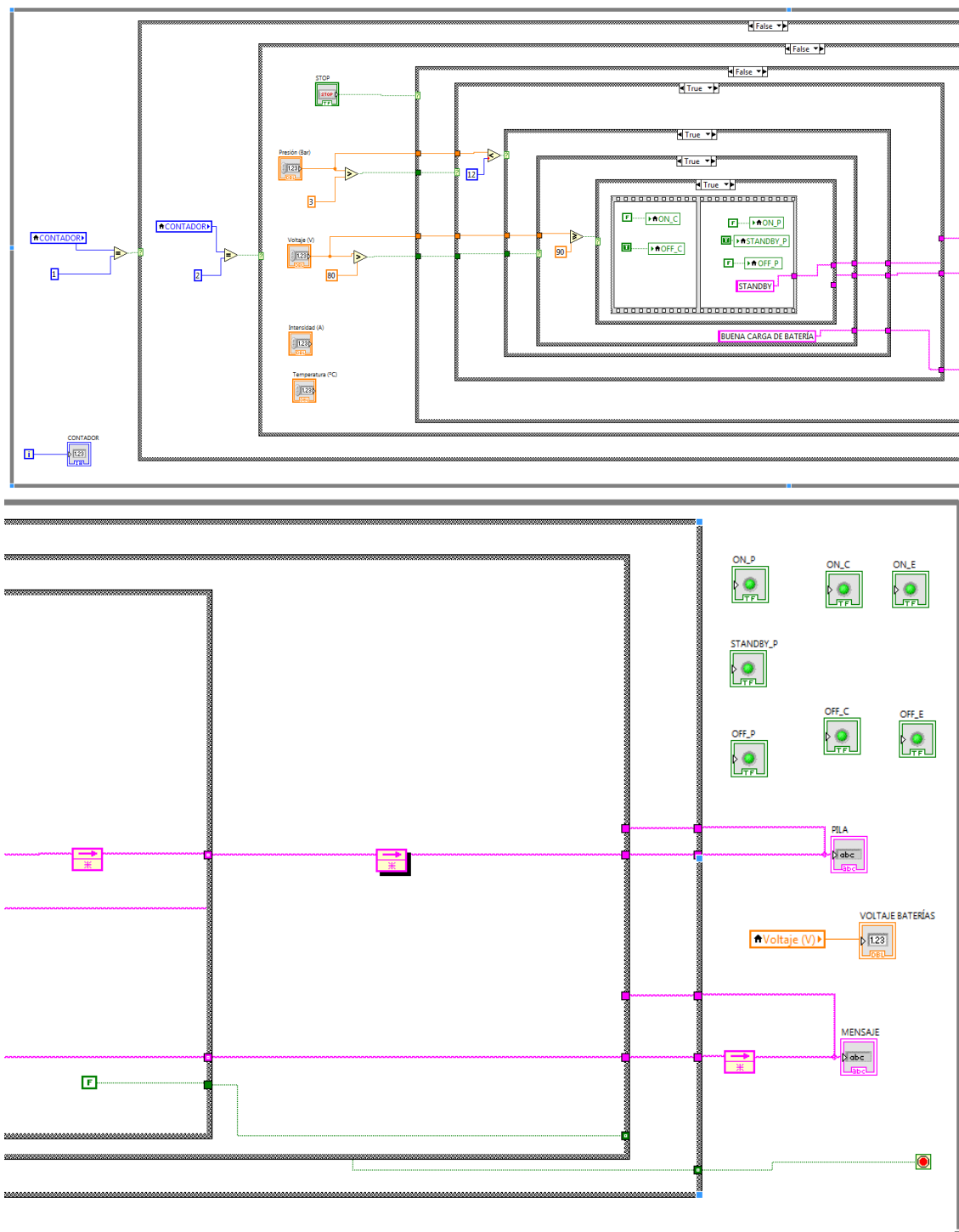


Figura 5.7 Séptima Etapa.

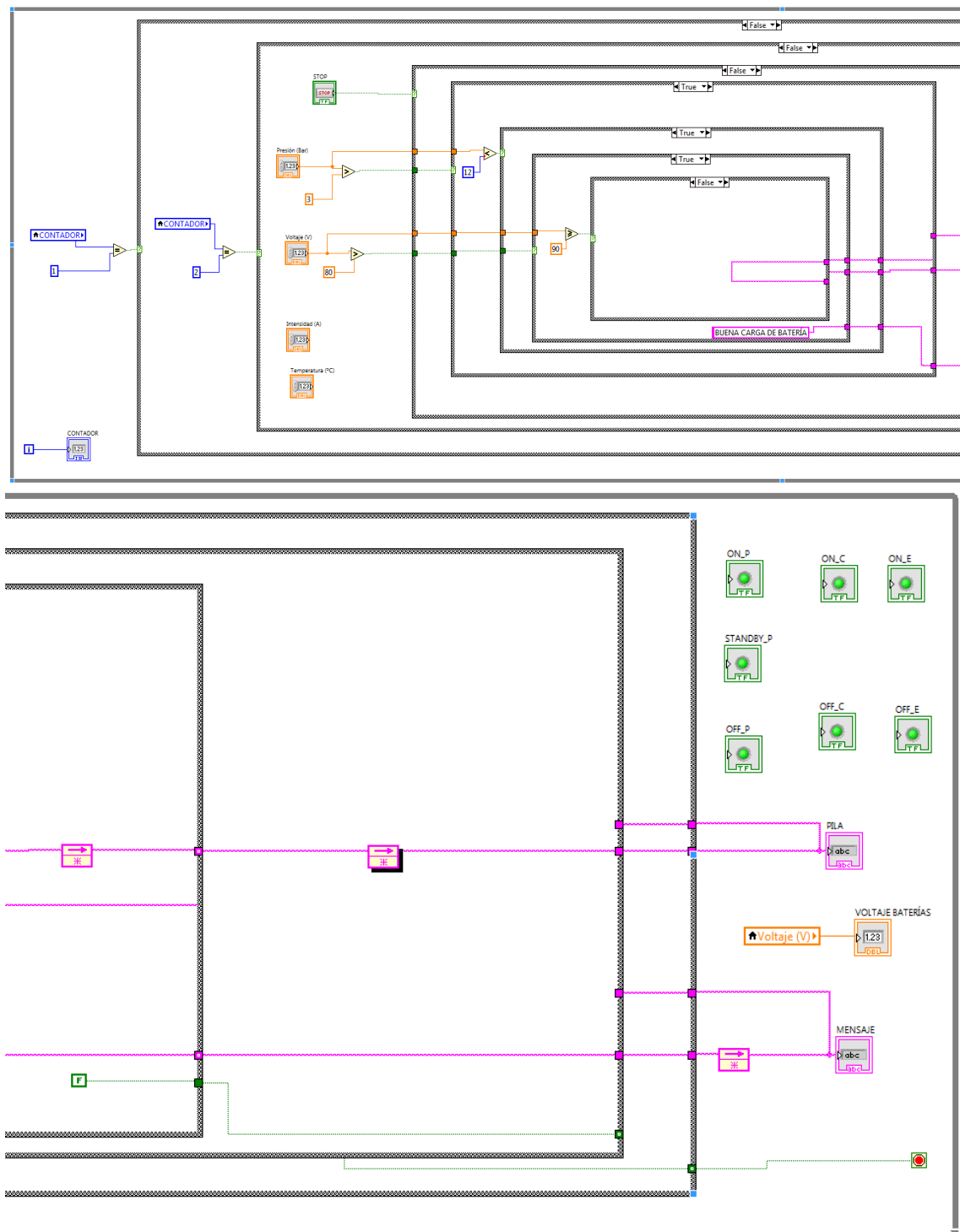


Figura 5.8 Octava Etapa.

A modo de resumen y para que quede todo más claro se presenta a continuación un diagrama de flujo:



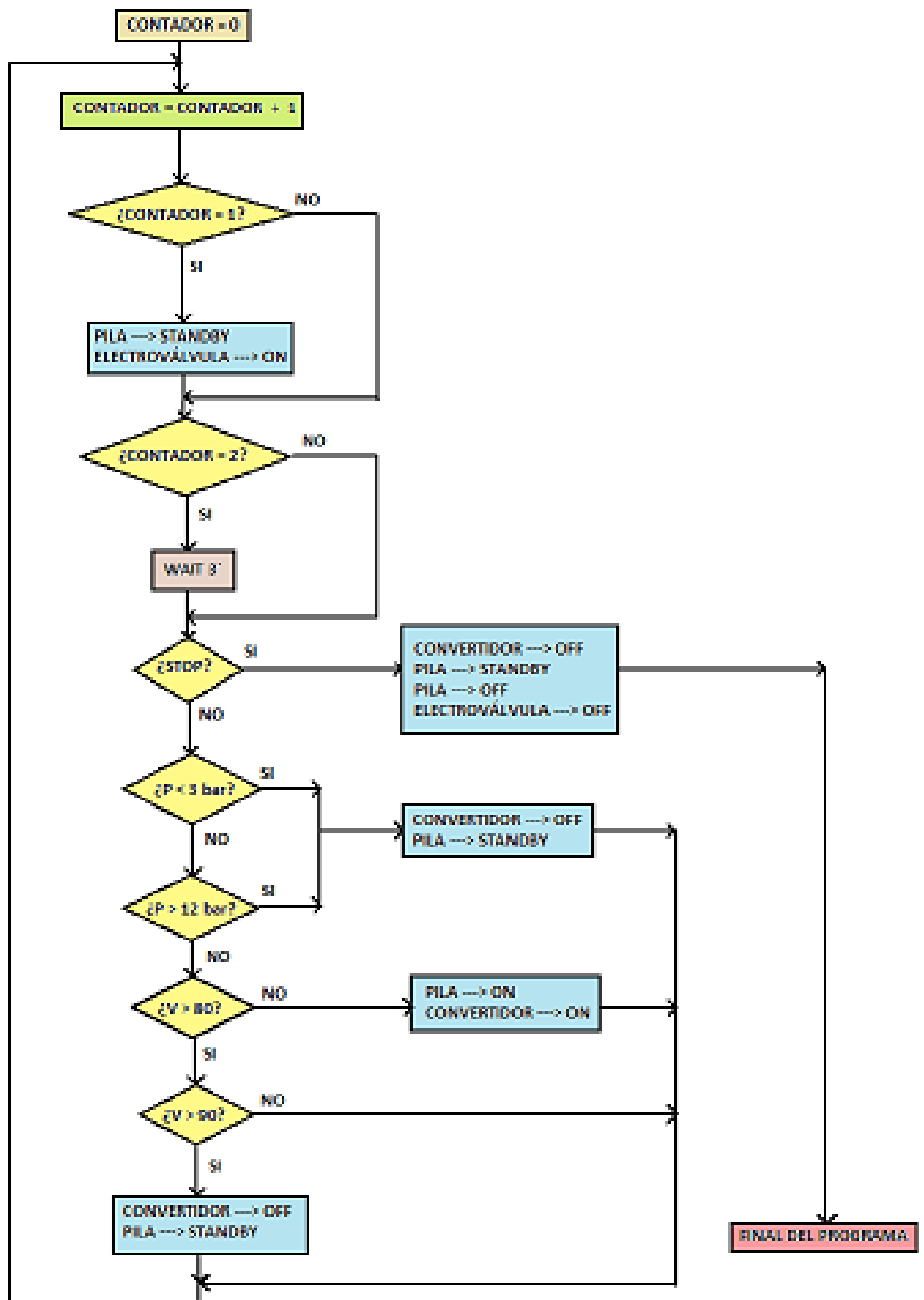


Figura 5.9 Diagrama de Flujo.

Por último se muestra la interfaz que verá el usuario al utilizar el algoritmo:

ESTADOS DE FUNCIONAMIENTO	
PILA	CONVERTIDOR
ON_P	ON_C
STANDBY_P	OFF_C
OFF_P	

MENSAJES	
PILA	VOLTAJE BATERÍAS
OFF	40

DATOS DE ENTRADA	
Voltaje (V)	80
Intensidad (A)	1
Presión (Bar)	4
Temperatura (°C)	25

**Figura 5.10** Interfaz del Usuario.

En datos de entrada se pueden controlar todas las variables, la carga de las baterías, la intensidad, la presión de las botellas y la temperatura de la PEM, tomada esta última del propio SCADA de la pila.

En estados de funcionamiento se puede ver qué está funcionando en cada momento, así como la interacción entre cada sistema.

En mensajes se ve información como qué tipo de mensaje se le envía a la PEM, el voltaje de las baterías o información general sobre el estado de nuestro sistema.

## 6 Conclusiones y Líneas Futuras de Investigación

---

*El valor de una idea radica en el uso de la misma.*

TOMAS A. EDISON

En este capítulo se pretende, a modo de resumen, indicar las conclusiones finales del trabajo llevado a cabo, así como las posibles líneas de trabajo futuro.

### 6.1 Conclusiones

En este trabajo se llega a una serie de conclusiones en el diseño de la bancada y el sistema de control.

Por un lado, en el diseño de la bancada se tiene un diseño teórico, el cuál debe ser probado físicamente. Aún así, dado que para el diseño se tomó como ejemplo una bancada del Centro Nacional del Hidrógeno y se contó con la ayuda de Eduardo del Inta, se puede asumir que dicho diseño es correcto. A todo ello hay que sumarle la idea de colocar las botellas de hidruro en los ventiladores de la PEM, aprovechando así el calor que ésta desprende para calentar, o evitar el enfriamiento, de las botellas y favorecer la salida del hidrógeno. El diseño de la bancada ha sido tedioso, ya que no se conocía ni se tenía ninguna como ejemplo. En internet no se encontró nada de interés, por lo que fue fundamental la visita a las instalaciones del Centro Nacional de Hidrógeno para poder seguir avanzando con el diseño. Dicho diseño se encuentra optimizado, ya que la distribución llevada a cabo utiliza el mínimo de material posible, garantizando así que las pérdidas de carga en el sistema sean mínimas.

Por otro lado, en el diseño del sistema de control, la primera fase fue aprender LabView, programa con el que se ha realizado dicho sistema. LabView se trata de un programa sencillo de utilizar que permite la ejecución de órdenes en paralelo, lo que agiliza mucho los procesos. A diferencia de programas como Matlab, que trabajan de forma secuencial, en LabView se pueden realizar varias tareas a la vez, lo que conlleva una mayor rapidez de ejecución. El algoritmo realizado se ha comprobado que funciona correctamente, quedando pendiente la comprobación real conectando todo el sistema. En dicho programa se puede decir que existen cuatro fases críticas: el botón de STOP debe parar todo el sistema, independientemente de que se esté ejecutando; si la presión que llega a la PEM es menor de 3 bar debe de dejar de funcionar, ya que podría deshidratarse y dañarse; tanto el encendido como el apagado de PEM tiene una secuencia y un orden que se debe de cumplir, ya que de no ser así la PEM no funcionaría; por último, al PEM y el controlador DC/DC tienen también un orden de prioridad, en el encendido y el apagado, con el fin de no dañar la PEM. Pues bien, todo ello ha sido comprobado y verificado de que no se produce ningún tipo de fallo ni error bajo ninguna circunstancia.

En resumen, tanto el diseño de la bancada y el sistema de control se consideran correctos y eficientes a falta de su comprobación física una vez se monte la bancada.

## **6.2 Líneas Futuras de Investigación**

La continuación inmediata a este trabajo es la propia instalación de la PEM en la bancada. Una vez que se tienen todos los materiales se puede montar dicha bancada. Una vez montada se seguirían los siguientes pasos:

- 1.** Caracterización de las botellas de hidruro y de la pila de combustible.
- 2.** Comprobación de que todo el sistema funciona correctamente en la bancada.
- 3.** Instalación en el coche FOX.
- 4.** Comprobación de que todo funciona correctamente en el coche.

# Índice de Figuras

---

1.1	Esquema General Conexión Bancada	2
2.1	Funcionamiento de la Pila de Combustible	6
2.2	William	7
2.3	Configuración del dispositivo de William R. Grove, según su publicación "On the Gas Voltaic Battery", Philosophical Magazine and Journal of Science (1843) p. 272	7
2.4	Curva de Polarización NEXA 1200 Teórica	8
3.1	Centro Nacional del Hidrógeno	11
3.2	Montaje CNH	12
3.3	Medidor de Caudal Másico	12
3.4	Regulador de Presión	12
3.5	Conector en T para Transductor de Presión	13
3.6	Tubbing	13
3.7	Válvula de Bola	13
3.8	Espiga	13
3.9	Nuts y Ferrulas	14
3.10	Conector en T	14
3.11	Tranductor dde Presión	14
3.12	Unión en Codo	14
3.13	Botellas de Hidruro	15
3.14	Pila PEM	15
3.15	Electroválvula	15
3.16	Convertidor DC/DC	15
3.17	Tarjeta CB-68LP	16
3.18	Relé	16
3.19	Baterías	16
3.20	Carga	16
3.21	Fuente	17
3.22	Esquema Inicial	17
3.23	Segundo Esquema	18
3.24	Instalación de Hidrógeno	18
3.25	Instalación de la parte de Potencia y de Datos	19
4.1	Botella de Hidruro	22
4.2	a) Presión vs Temperatura, b) Refrigeración en la carga	23
4.3	Calentamiento en la Descarga	23
4.4	Rendimiento de las Botellas durante la Descarga	23
4.5	Comparación en la Descarga de dos Botellas	24
4.6	Data Sheet	25
4.7	Botellas de Hidrógeno Puro	26

4.8	Línea exterior	26
4.9	Comprobación de Fugas de Hidrógeno	27
4.10	Refrigeración en la Carga	27
4.11	Manómetro y Llave de Paso en el Interior del Laboratorio	28
5.1	Primera Etapa	33
5.2	Segunda Etapa	34
5.3	Tercera Etapa	35
5.4	Cuarta Etapa	36
5.5	Quinta Etapa	37
5.6	Sexta Etapa	38
5.7	Séptima Etapa	39
5.8	Octava Etapa	40
5.9	Diagrama de Flujo	41
5.10	Interfaz del Usuario	42

# Índice de Tablas

---

2.1	Características Técnicas de la Fuel Cell
-----	--

9
---





## Bibliografía

---

- [1] Juan José Márquez Quintero. *Desarrollo de Sistema de Control y Supervisión de una PEMFC para su Integración en Sistemas Híbridos de Energía*. Sevilla, 2015
- [2] S. Giddey, S.P.S. Badwal, F.T. Ciacchi, D. Fini, B.A. Sexton, F. Glenn, P.W. Leech. *Investigations on fabrication and lifetime performance of self– air breathing direct hydrogen micro fuel cells* International Journal of Hydrogen Energy 35 (2010)
- [3] Frederick D. Gregory. *Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems* Washington (1997)
- [4] Dennis J. Eichenberg. *The Fuel Cell Powered Club Car* Carryall Glenn Research Center, Cleveland, Ohio (2005)
- [5] J.I. San Martín, I. Zamora, J.J. San Martín, V. Aperibay, P. Eguia. *Análisis del Comportamiento Dinámico de una Pila de Combustible PEMFC* (2009)
- [6] Stefano Ferrarese. *Upgrade e Commissioning di un Sistema di Test ad Alte Prestazioni per Celle a Combustibile di Tipo PEM* Università Degli Studi di Padova (2013)
- [7] Heliocentris. *Datasheet*
- [8] Asociación Española de Pilas de Combustible. [http://www.appice.es/app.php?x=3&x2=1\\_1](http://www.appice.es/app.php?x=3&x2=1_1)

